



HAL
open science

Référentiels pour l'intégration multi-sensorielle et sensomotrice: une approche neuro-robotique

Christophe Halgand

► **To cite this version:**

Christophe Halgand. Référentiels pour l'intégration multi-sensorielle et sensomotrice: une approche neuro-robotique. Automatique / Robotique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2011. Français. NNT: . tel-00629217

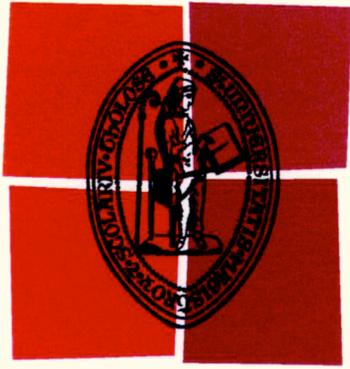
HAL Id: tel-00629217

<https://theses.hal.science/tel-00629217>

Submitted on 5 Oct 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
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :
Université Toulouse III Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Discipline ou spécialité :
Systèmes Automatiques

Présentée et soutenue par :
Christophe HALGAND

le : mardi 20 septembre 2011

Titre :

Référentiels pour l'intégration multisensorielle et sensorimotrice :
une approche neuro-robotique

Ecole doctorale :
Systèmes (EDSYS)

Unité de recherche :
LAAS-CNRS et CerCo (UMR5549)

Directeur(s) de Thèse :
Philippe SOUERES
Yves TROTTER

Rapporteurs :

Benoît GIRARD
Guillaume MASSON

Membre(s) du jury :

Christophe JOUFFRAIS (membre invité)
Pier-Giorgio ZANONE

Résumé

Le sujet de cette thèse aborde le problème de la représentation de l'espace dans la boucle sensorimotrice chez le primate et sur des systèmes robotiques. Chez l'être vivant, l'intégration multisensorielle passe par la problématique des référentiels pour lesquels il existe des modèles théoriques basés sur des données électrophysiologiques. Cependant ces derniers n'expliquent pas tous les résultats issus des travaux en neurosciences. Dans une première partie de l'étude, nous avons enregistré et mis en évidence, chez le singe vigile, l'influence de la direction de la tête par rapport au corps et de son interaction avec celle de l'œil par rapport à la tête au sein de l'aire visuelle primaire (V1) sous forme de modulation de l'activité neuronale. L'effet de la position de la tête n'avait été, jusqu'à présent, montré que dans le cortex pariétal, aire hautement intégrative. Nos résultats mettent clairement en évidence l'existence d'une intégration distribuée et d'une construction d'une représentation stable et unifiée en amont du cortex pariétal. Ces intégrations semblent exister également après le cortex pariétal postérieur. Des résultats électrophysiologiques, longtemps ignorés mais confirmés récemment ont montré l'influence de la position des yeux au sein du cortex prémoteur dorsal. Une deuxième étude basée sur le formalisme de l'asservissement visuel en robotique, nous a permis de proposer une interprétation de ces résultats. La mise en œuvre d'un réseau de neurones artificiels entraîné à partir de ce formalisme montre la similitude de l'influence des effets de la position des yeux observés au niveau cortical et confirme notre interprétation. Sur l'ensemble de tous ces travaux, nous proposons une discussion sous l'angle des deux formalismes neuro-robotique où nous présentons un bilan fonctionnel de la perception à l'action. Finalement, nous proposons l'existence d'une origine multisensorielle qui avantagerait l'intégration multisensorielle en neurosciences comme en robotique.

mots clés : modélisation, enregistrement extra-cellulaire chez le singe éveillé, asservissement visuel, transformations de coordonnées, boucle sensorimotrice, réseaux de neurones artificiels

Abstract

This thesis is an interdisciplinary approach in Neuroscience and robotics that investigates the frame of references based on multisensory integration in the sensorimotor loop. Theoretical modeling based on experimental studies in neuroscience have been proposed but are not satisfactory. In a first study we have performed electrophysiological recordings in the primary visual cortex of a behaving monkey and showed that extraretinal signals related to the eye position and to the neck position modulate visual activity of cortical neurons. This result parallels previous data shown in the parietal cortex and strongly suggest a distributed cortical mechanism for construction of space representation. The second study aimed to interpret the modulation, due to eye position relative to the head, of the neuronal activity in the dorsal premotor cortex. For this, humanoid robotics formalisms were used, in particular visual servoing. We used this purely mathematical model to train an artificial neural network in order to show similarities between artificial neural activity and biological neuronal activity. From this work, we propose a discussion in terms of both neuroscience and robotics formalisms, where we present a functional assessment from perception to action. Finally, we propose the existence of a multisensory origin that would benefit the multisensory integration in neuroscience as in robotics.

keywords : modelisation, extracellular recordings in the behaving monkey, visual servoing, coordinate transformation, sensorimotor loop, artificial neural network

Remerciements

Je remercie très sincèrement mes deux responsables de thèse Philippe SOUERES et Yves TROTTER pour leur soutien et leur apport dans l'encadrement de ces travaux de thèse. J'espère que nos chemins se croiseront à nouveau...

Je tiens également à remercier tous les membres du jury : Pier-Giorgio ZANONE qui a accepté de présider le jury, Benoît GIRARD et Guillaume MASSON qui ont accepté d'en être les rapporteurs, Olivier SIGAUD et Christophe JOUFFRAIS qui ont bien voulu examiner ce travail.

J'exprime aussi ma reconnaissance envers tous les ITAs, les chercheurs et étudiants du LAAS-CNRS et du CerCo, qui m'ont soutenu. En particulier, Angéline MANTIONNE qui a su prendre soin de mes sujets, Luc RENAUD qui nous a assisté pendant les chirurgies, l'équipe du SITH sur qui repose le bon fonctionnement de toutes les expériences du CerCo.

Je suis également très reconnaissant à Laura HALGAND et notre fille Margot qui ont connu des journées et des weekends sans moi mais qui m'ont toujours épaulé.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Percevoir pour agir	5
2.1	Le modèle humain	5
2.1.1	Les référentiels et transformations de coordonnées	6
2.1.2	Le cortex pariétal postérieur	6
2.1.3	Les modèles de la littérature	7
2.1.4	Une intégration multisensorielle distribuée	10
2.2	Le robot	12
2.2.1	Perception pour la commande	17
2.2.2	Commande du mouvement	19
2.3	Conclusion	22
3	Etude électrophysiologique dans V1	25
3.1	Introduction	25
3.2	Description de l'étude	26
3.3	Etude électrophysiologique : Matériels et méthodes	27
3.3.1	Protocole	27
3.3.2	Préparation des animaux	27
3.3.3	Chaînes instrumentales	29
3.3.4	Le signal neuronal	31
3.3.5	Représentation graphique	31
3.3.6	Traitement des données	32
3.4	Résultats	36
3.4.1	Effet des différents facteurs modulateurs	36
3.5	Discussion	53
3.5.1	Synthèse de nos résultats	53
3.5.2	D'un point de vue protocolaire	54
3.5.3	Paramètres de codage de l'information	55

3.5.4	Origine des signaux extra-rétiniens	56
3.5.5	Intégration de nos résultats dans la littérature	57
3.5.6	Perspectives	58
3.6	Conclusion	59
4	Effet de l'orientation du regard dans PMd	61
4.1	Quelles variables et quels référentiels sont utilisés par le SNC pour le contrôle d'un mouvement ?	62
4.2	Données électrophysiologiques	68
4.2.1	Tâche comportementale :	68
4.2.2	Résultats :	68
4.2.3	Conclusion	69
4.3	Synthèse d'une loi de commande référencée vision	70
4.3.1	L'asservissement visuel	71
4.3.2	Le modèle cinématique anthropomorphe	73
4.3.3	Expression des tâches	74
4.3.4	Pondération et gestion de la redondance	77
4.3.5	Contrôleur des deux tâches	78
4.3.6	Dynamique des deux tâches	80
4.3.7	Effet de la position du regard sur le contrôleur de la main	82
4.4	Modélisation du contrôleur d'atteinte avec un réseau de neurones artificiels	85
4.4.1	Modèle cinématique et contrôleur	86
4.4.2	Description du réseau de neurones artificiels	87
4.4.3	L'apprentissage du RDNa	89
4.4.4	Résultat	91
4.4.5	Comparaison de l'activité des neurones artificiels et des neurones biologiques	100
4.5	Discussion	100
4.6	Conclusion	102
5	De la perception à l'action	103
5.1	Rôle fonctionnel des signaux d'orientation des yeux/tête et de la tête/corps	104
5.1.1	De la perception à l'action : bilan des aires où ces signaux modulent l'activité	104
5.1.2	Les paramètres présents lors de la perception multisensorielle	109
5.1.3	Les paramètres nécessaires à la commande de gestes visuellement guidés	111
5.2	Quel invariant géométrique pour la représentation multisensorielle et le contrôle du mouvement ?	111

5.3 Conclusion	115
6 Conclusion	117
Références	121

1

Introduction

Cette thèse est à la confluence des neurosciences et de la robotique. Depuis quelques années, ces deux domaines interagissent sur plusieurs plans. L'axe le plus développé est certainement le mimétisme des mouvements de l'homme et de l'animal. L'idée est de rendre le mouvement des robots plus naturel. En contrepartie, les roboticiens offrent un cadre théorique pour tester et valider des modèles de minimisation de critères pour l'exécution de gestes. Le cadre de cette thèse concerne un aspect plus fondamental qui est la représentation de l'espace mais surtout l'intégration multisensorielle qui est à la base de la perception unifiée et non ambiguë de notre environnement.

Les neurosciences font intervenir des domaines interdisciplinaires comme la biologie, la médecine, la psychologie, l'informatique, les mathématiques, le traitement du signal... Chacun de ces domaines apporte sa pierre à l'édifice pour comprendre la structure et le fonctionnement de l'homme ou de l'animal. Les neurobiologistes observent, enregistrent et modélisent afin de comprendre chacune des capacités du système nerveux à l'aide de techniques diverses offrant un regard à des échelles différentes. Dans cette thèse, nous nous intéressons plus particulièrement à l'Homme et à l'un de ses modèles immédiat qui est le singe. Comment l'homme voit, entend, ressent-il son environnement ? Comment perçoit-on que notre monde est stable ? Comment le système nerveux central intègre-t-il ces différentes informations sensorielles pour agir dans l'environnement ? Ces questions très générales, qui font l'objet de travaux depuis de nombreuses années en neurosciences, sont à la base de cette thèse.

1. INTRODUCTION

Les roboticiens, de leur côté, développent des machines de plus en plus sophistiquées et performantes. Ces machines sont un condensé de technologies qui n'arrêtent pas d'évoluer. Les ingénieurs sont confrontés à des problèmes de perception, de décision et d'action. Un des objectifs principaux des roboticiens est d'élaborer des machines de plus en plus autonomes. L'obtention de cette autonomie est également à la base des travaux présentés dans cette thèse. L'autonomie passe par la capacité d'interagir avec son environnement. Comment peut-on donner au robot une perception unifiée et non ambiguë de son environnement comme le SNC humain le permet ? Comment permettre au robot de définir la tâche à réaliser en fonction de la situation ? Les roboticiens se heurtent à la même problématique que les neurobiologistes en l'abordant sous un angle différent.

Cette différence vient du fait que l'homme détient cette capacité de perception unifiée alors que le roboticien cherche à la conférer au robot. D'un côté, on se demande ce qui permet à l'homme d'être autonome et de l'autre comment permettre au robot de devenir autonome. Ce n'est pas tant le fait de répliquer l'homme qui intéresse les roboticiens mais plutôt de comprendre ses capacités.

Neurobiologistes et roboticiens s'accordent sur le fait que l'autonomie chez l'homme comme chez le robot passe par l'intégration des signaux multisensoriels et la représentation de l'environnement qui en découle.

Les approches modernes dans le domaine de la neurobiologie, notamment de l'imagerie cérébrale, permettent de mieux caractériser l'implication des différentes aires corticales dans la représentation de l'espace et le contrôle du mouvement. Elles offrent ainsi une meilleure compréhension de la nature des traitements neuronaux qui s'y opèrent. Ces connaissances fondamentales permettent d'élaborer des hypothèses et des modèles de fonctionnement du système nerveux central (SNC). Le formalisme de la robotique peut offrir un cadre théorique pour tester ces hypothèses et identifier les modèles qui peuvent être intéressants à adapter aux robots. L'homme et la machine perçoivent des signaux sensoriels d'origines diverses au moyen de récepteurs ou capteurs nécessaires à l'élaboration de tout acte moteur. Notre démarche consiste à comprendre comment le cerveau traite les informations sensorimotrices et à définir en conséquence des règles de fonctionnement adaptées à la machine. Chez l'animal, des signaux sensoriels de diverses modalités sont codés dans des structures cérébrales successives de façon topographique. La réalisation d'actes moteurs complexes et adaptés à des situations particulières de l'environnement requiert l'accès simultané aux différentes cartes sensorielles. Cela nécessite l'existence de repères multiples, le passage d'un repère à un autre dépendant du contexte sensorimoteur. Une condition qui apparaît alors nécessaire, chez l'animal et le robot, est la mise en commun de l'ensemble des informations perçues. Des données issues de la physiologie et des modèles robotiques nous conduisent à l'hypothèse d'une origine multisensorielle pour la mise en relation des différentes données exprimées dans différents référentiels.

Cette thèse s'est déroulée au sein de deux équipes de recherches toulousaines. L'une est l'équipe Espace et Contexte 3D du CerCo (Centre de Recherche Cerveau et Cognition) et l'autre est l'équipe Gepetto du LAAS-CNRS (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes). Les travaux de recherches du CerCo sont centrés sur la vision, l'intégration multimodale et les fonctions cognitives telles que la perception de l'espace, la catégorisation et la reconnaissance de l'objet, la conscience et les états mentaux. Les travaux de recherches de l'équipe Gepetto du LAAS-CNRS sont centrés sur la modélisation, la planification de mouvements et la commande des systèmes anthropomorphes avec une application directe en robotique humanoïde.

La première partie de cette thèse, présentée au chapitre 2, présente un état de l'art en neurosciences et en robotique sur les travaux dédiés à la représentation de l'espace et l'intégration multisensorielle pour la commande du mouvement. A partir des connaissances en neurosciences nous avons testé et validé l'hypothèse de la présence des signaux de position de la tête par rapport au corps et de leurs interactions possibles avec les signaux de position des yeux par rapport à la tête au tout début du traitement visuel (aire visuelle primaire - V1). Ce premier travail est issu d'une étude électrophysiologique extracellulaire réalisée chez le singe éveillé tout au long de ces trois ans de thèse. La description et les résultats de cette étude sont présentés au chapitre 3. En parallèle, nous avons utilisé les formalismes issus de la robotique pour interpréter l'effet des signaux de positions des yeux par rapport à la tête et de la tête par rapport au corps lors de la planification et de l'exécution d'un geste d'atteinte visuellement guidé (aire prémotrice dorsale - PMd). Bien que le formalisme théorique de la robotique mette clairement en évidence la présence de ces signaux, nous avons développé un réseau de neurones artificiels pour permettre une comparaison directe avec l'activité neuronale enregistrée chez le singe dans l'aire prémotrice dorsale (PMd) [Jouffrais et al. 2000]. A partir de ces deux études, nous présentons au chapitre 6 un bilan des différents rôles que peuvent jouer ces signaux au sein de la boucle sensorimotrice pour les gestes d'atteinte et d'orientation du regard. Enfin, sur la base de ces données, nous argumentons sur l'existence d'une origine multisensorielle à la base du procédé de la mise en relation des informations spatiales multisensorielles. D'un point de vue robotique, cette origine pourrait jouer un rôle clé dans la fusion des données multi-capteurs pour la représentation spatiale et la synthèse des tâches référencées capteurs.

2

Percevoir pour agir

2.1 Le modèle humain

Pour agir dans un environnement, notre cerveau a besoin de fusionner toutes les informations issues des organes sensoriels. Cette fusion permet au SNC de générer une commande volontaire cohérente qui sera exécutée par nos organes moteurs. Logiquement, pour combiner toutes les informations sensorielles, il est nécessaire d'exprimer ces dernières dans un même référentiel. Le cerveau doit donc mettre en place des transformations de coordonnées entre les différents référentiels utilisés pour coder chaque sens afin d'aboutir à une représentation stable et unifiée de l'espace. Classiquement, le cortex pariétal apparaît comme le lieu propice à cette représentation. Il est considéré comme une zone associative de très haut niveau des modalités sensorielles du cortex cérébral [Andersen 1997]. Malheureusement, il n'a pas été possible de mettre en évidence un codage cartographique du monde perçu dans un seul référentiel [Stein 1989]. Cette étude ne remet pas en doute le fait qu'il soit nécessaire de combiner nos informations sensorielles pour agir de manière cohérente dans l'environnement. Cette absence de représentation et la nature des déficits engendrés par des lésions du cortex pariétal ont conduit un grand nombre de chercheurs à étudier l'activité de cette zone lors de geste d'atteinte, de pointage et de saccades. Nous allons décrire les différents modèles d'intégration multisensorielle au sein du cortex pariétal pour la commande de gestes d'atteinte et de pointage. Nous commençons par présenter les différents référentiels dans lesquels chacun de nos sens est exprimé avec les paramètres nécessaires aux transformations de coordonnées entre ces référentiels. Nous

2. PERCEVOIR POUR AGIR

présentons ensuite les différents modèles de la boucle sensorimotrice. Enfin, nous mettons en évidence que ce processus d'intégration multisensorielle n'est pas limité au cortex pariétal mais nécessite un recrutement de l'ensemble des aires corticales.

2.1.1 Les référentiels et transformations de coordonnées

Les différents systèmes sensoriels captent puis traitent des informations de natures différentes dans le même environnement. Chacun de ces systèmes est alors en mesure d'apporter des données complémentaires sur la localisation d'éléments perçus. Chaque information sensorielle est exprimée, au départ du traitement cortical, dans le référentiel lié à la position de l'organe correspondant. Une cible visuelle est codée dans un référentiel centré sur l'œil (ou oculocentré). Une cible sonore est codée dans un référentiel centré sur la tête (ou craniocentré). Une cible tactile est exprimée par rapport à la surface de la peau qui est décrite comme corps-centré dans la littérature. D'un point de vue mathématique, les transformations de coordonnées entre ces référentiels (oculocentré, craniocentré et corps-centré) sont réalisables à partir de deux signaux somatiques : la position de l'œil dans l'orbite et la position de la tête par rapport au corps. Par exemple, la position d'une cible visuelle exprimée dans un référentiel oculocentré peut être exprimée dans un référentiel craniocentré en la combinant avec la position de l'œil par rapport à la tête. Cette position est ainsi exprimée dans un référentiel craniocentré. Si on prend maintenant en compte la position de la tête par rapport au corps, alors la position de la cible peut être exprimée dans un référentiel corps-centré. Il est possible de réaliser les transformées inverses en prenant en compte d'abord la position du corps par rapport à la tête, puis de la tête par rapport à l'œil. Pour découvrir quel référentiel est utilisé par le cerveau lors de l'intégration multisensorielle, il faut donc étudier l'activité des neurones enregistrés en fonction de ces deux paramètres sur le site de l'intégration.

2.1.2 Le cortex pariétal postérieur

Le cortex pariétal postérieur (PPC) présente toutes les caractéristiques fonctionnelles pour être le site cortical où notre cerveau réalise l'intégration multisensorielle pour la représentation de l'environnement. En effet, celui-ci est connu pour recevoir des projections de signaux visuels, auditifs, somesthésiques et vestibulaires [Andersen 1997]. Ces différents signaux modulent l'activité de neurones dans différentes aires du cortex pariétal. L'aire LIP (Lateral IntraParietal) reçoit des signaux visuels et auditifs [Stricanne et al. 1996], [Cohen 2009]. Cette aire est fortement impliquée dans les mouvements liés aux saccades oculaires [Colby et al. 1996]. En effet, elle projette principalement sur le "Frontal Eye Field" (ou FEF) qui est considéré comme la dernière étape corticale avant la commande des saccades oculaires [Schall et al. 1995]. L'activité des neurones de l'aire VIP (Ventral IntraParietal) est modulée par des signaux de type

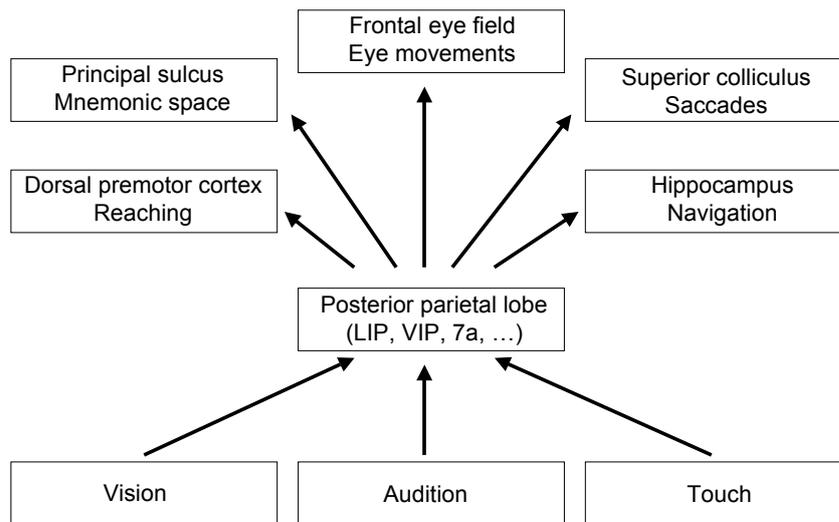


FIGURE 2.1 – Vue hiérarchique de la boucle sensorimotrice

somesthésique, visuel, vestibulaire ou encore auditif [Colby et al. 1993], [Bremmer et al. 2002], [Schlack et al. 2005]. L’aire MIP (Medial IntraParietal) est connue pour sa participation au codage des cibles visuelles à atteindre et dont ses neurones répondent à des stimuli visuels et proprioceptifs [Colby et Duhamel 1991]. Leurs activités reflètent les mouvements des membres et la localisation de la main [Johnson et al. 1996]. Elle est fortement associée à la région du cortex spécialisée dans le geste d’atteinte connue sous le nom de “PRR” pour “Parietal Reach Region” [Batista et al. 1999]. Elle est médiane et postérieure à LIP chevauchant l’aire V6a et MIP. Une étude en IRMf chez l’homme montre que la région homologue de PRR chez le singe contient la mise à jour de l’état postural du corps [Pellijeff et al. 2006]. Enfin, l’aire AIP est impliquée dans les gestes de saisie visuellement guidés [Murata et al. 1996]. Toutes ces études mettent en évidence le codage neuronal multisensoriel au sein du cortex pariétal. La principale cible de ces régions sont les aires prémotrices. Le cortex pariétal montre ainsi son rôle dans le transfert des informations sensorielles pour la planification et le contrôle du mouvement [Rizzolatti et al. 1997].

2.1.3 Les modèles de la littérature

La majorité des travaux que nous présentons dans cette section se base sur un traitement hiérarchique des informations sensorielles convergeant vers le cortex pariétal. Ce dernier projette vers les différentes régions spécialisées en fonction du but et de la tâche à réaliser. Cette représentation des processus neuronaux est reproduite à la figure 2.1 d’après [Pouget et al. 2002].

Un travail synthétique a été réalisé pour décrire le rôle du cortex pariétal dans l’intégration multisensorielle et sensorimotrice nécessaire à l’exécution d’un geste d’atteinte vers une cible

2. PERCEVOIR POUR AGIR

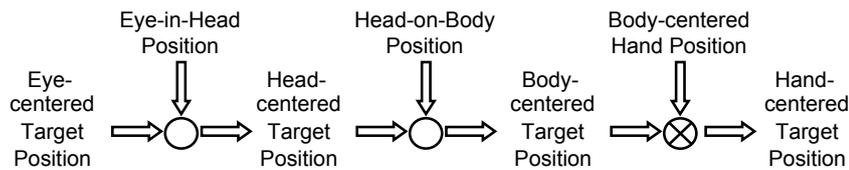


FIGURE 2.2 – Modèle sériel : La position de la cible visuelle exprimée dans les coordonnées oculocentrées est transformée dans les coordonnées main-centrées par une suite de transformation. Cette dernière est possible grâce à la prise en compte de la position de l'œil par rapport à la tête puis de la tête par rapport au corps et enfin de la main par rapport au corps [Flanders et al. 1992], [McIntyre et al. 1997].

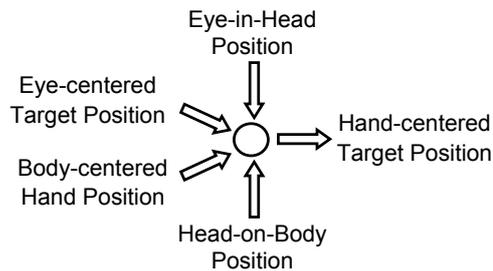


FIGURE 2.3 – Modèle combinatoire : La position de la cible dans le référentiel oculocentré est transformée dans le référentiel main-centré en intégrant la position de l'œil dans la tête, de la tête sur le corps et enfin de la main dans le référentiel du corps [Battaglia-Mayer et al. 2000].

visuelle et/ou auditive [Andersen et Buneo 2002]. Les auteurs discutent des deux principaux types de modèles d'intégration multisensorielle au sein du cortex pariétal dans le cas d'un geste d'atteinte. Les deux types sont présentés aux figures 2.2 et 2.3.

Le premier modèle est basé sur l'hypothèse d'un processus sériel, c'est à dire d'une série de transformations (Fig. 2.2) [Flanders et al. 1992], [McIntyre et al. 1997]. Ce modèle reflète les premières idées expliquant la présence d'un codage neuronal dans les différents référentiels et la modulation neuronale due aux signaux sensoriels de la position de l'œil par rapport à la tête et de la tête par rapport au corps. Malheureusement, aucune étude n'a pu montrer une organisation aussi sérielle au sein du cortex pariétal postérieur (voir fig. 2.2).

Le second modèle (Fig. 2.3) est de type combinatoire [Battaglia-Mayer et al. 2000]. Si le premier modèle ne peut pas être démontré, la présence de tous ces référentiels a pourtant été enregistrée [Andersen 1997], [Graziano 2001], [Sun et Wang 2010], [McGuire et Sabes 2009], [Pouget et al. 2002], [Mullette-Gillman et al. 2005]. Ainsi le modèle de la figure 2.3 représente l'observation faite au sein du cortex pariétal postérieur sans apporter de réponses tant qu'au processus mathématique mis en œuvre dans le cortex pariétal. Quel processus mathématique est mis en place pour réaliser cette transformation ? Comment peut-on avoir toutes les représentations à la fois si elles ne sont pas réalisées en série ? Pourquoi une représentation main-centrée en sortie ? Ces modèles sont spécifiques au geste d'atteinte et ne peuvent pas expliquer tout ce qui

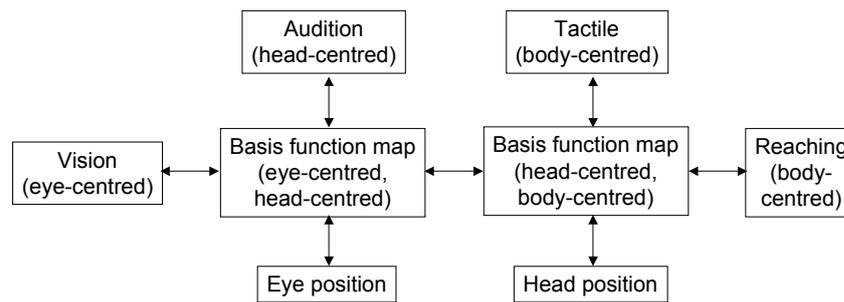


FIGURE 2.4 – Modèle combinatoire généralisé

se passe dans le cortex pariétal et l'intégration multisensorielle qui s'y opère. La modulation induite par un signal vestibulaire sur l'activité des neurones de l'aire VIP [Bremmer et al. 2002] nécessite sa prise en compte. De plus, le référentiel de sortie n'est pas clairement identifié car, pour les auteurs, les référentiels centrés sur la main, sur les membres ou sur le corps sont les mêmes. Ceci montre clairement que l'on ne comprend pas très bien ce qui se passe au sein du cortex pariétal. A partir de modèles mathématiques, certains neuroscientifiques tentent d'expliquer de manière plus générale les transformations de coordonnées au sein du cortex pariétal. Ils utilisent des réseaux de neurones artificiels (RDNa). Ce type d'outil permet de réaliser un calcul de transformation de coordonnées à partir d'un codage proche de ce qu'il a été observé dans les études électrophysiologiques. C'est ainsi que Zipser et Andersen proposent une explication de la présence d'un codage d'une cible visuelle dans un référentiel ni oculocentré, ni craniocentré mais défini comme étant intermédiaire [Zipser et Andersen 1988]. En effet, ils ont entraîné un RDNa de type perceptron dans le but d'étudier la transformation de coordonnées d'un référentiel oculocentré vers craniocentré connaissant la position des yeux par rapport à la tête. Dans la couche cachée, c'est-à-dire à une étape intermédiaire du calcul, l'activité de certains neurones montre un codage dans un référentiel intermédiaire comme ils ont pu l'observer au sein du cortex. A partir de ce travail pionnier, l'équipe de Pouget a réalisé différents travaux en utilisant les RDNa [Deneve et al. 2001], [Pouget et Sejnowski 1994], [Pouget et Sejnowski 1997] et propose, elle aussi, un modèle de type combinatoire (Fig. 2.4).

Le cortex pariétal postérieur est alors vu comme un RDNa qui permet d'obtenir la représentation d'une information issue de la vision, l'audition ou du toucher dans tous les référentiels possibles ce qui est encore plus proche des résultats obtenus lors des études électrophysiologiques [Andersen 1997], [Graziano 2001], [Sun et Wang 2010], [McGuire et Sabes 2009], [Pouget et al. 2002], [Mullette-Gillman et al. 2005]. La différence majeure à noter est le côté récurrent du réseau. Les transformations de coordonnées sont ainsi réalisées dans les deux sens (Fig. 2.4). Ce modèle d'intégration multisensorielle est aujourd'hui le plus élaboré. Même si ce dernier modèle reproduit les données électrophysiologiques du cortex pariétal postérieur, dans le sens où tous les référentiels sont présents (oculocentré, craniocentré,

2. PERCEVOIR POUR AGIR

corps-centré, intermédiaire), il ne prend pas en compte l'intégration du signal vestibulaire. Tous ces modèles ne s'intéressent qu'au cortex pariétal car ils se basent sur la représentation schématique présentée Fig. 2.1. Or, cette vue hiérarchique n'est plus en accord avec des études électrophysiologiques que nous présentons dans la section qui suit.

2.1.4 Une intégration multisensorielle distribuée

- **En amont du cortex pariétal** : L'effet de la position de l'œil dans l'orbite a été étudié dans de nombreuses aires sensorielles. Au sein du cortex auditif, une étude électrophysiologique chez le singe vigile s'est intéressée à cet effet sur l'activité des neurones impliqués dans la localisation de cibles sonores. Elle relate qu'un tiers des réponses neuronales de l'aire auditive primaire (A1) est modulé par la position de l'œil dans l'orbite [Werner-Reiss et al. 2003]. Ce résultat a été confirmé d'un point de vue anatomique et physiologique [Fu et al. 2004]. Dans le cortex somatosensoriel, la position de l'œil dans l'orbite module l'activité de neurones de l'aire 3a et plus précisément la partie latérale dédiée à la représentation du nerf ophtalmique [Zhang et al. 2008]. Dans le cortex visuel, plusieurs études ont montré une modulation de l'activité des neurones en fonction de la position de l'œil (V1 : [Weyand et Malpeli 1993], [Trotter et al. 1992], [Guo et Li 1997] [Trotter et Celebrini 1999] ; V2 : [Rosenbluth et Allman 2002] ; V3A : [Galletti et Battaglini 1989] ; V4 : [Bremmer 2000], [Rosenbluth et Allman 2002] ; MT et MST : [Bremmer et al. 1997] ; V6(PO) : [Galletti et al. 1995]). S'il est intuitif d'observer une représentation de la position de l'œil au sein du cortex somesthésique, elle l'est beaucoup moins au sein des cortex, auditif et visuel. Il existe donc dès le début du traitement cortical de l'audition et de la vision des communications ou des projections avec au moins un signal de type somesthésique. L'origine de ce dernier peut être multiple et pose encore débat. La première possibilité est celle d'une copie efférente de la commande des muscles des yeux. La seconde source serait un signal proprioceptif des muscles des yeux (signal afférent) qui pourrait venir du cortex somatosensoriel primaire (aire 3a) où la représentation de la position de l'œil a été montrée [Wang et al. 2007].

L'effet de la position des yeux par rapport à la tête n'est pas le seul paramètre qui vient moduler l'activité neuronale en amont du cortex pariétal et nous nous intéresserons plus particulièrement au cortex visuel primaire qui joue un rôle prépondérant dans la construction d'une représentation de l'espace qui nous entoure [Trotter et al. 2004].

Des réactions comportementales et neuronales à des stimuli visuels, auditifs puis aux deux simultanément ont permis de montrer un phénomène d'interactions multisensorielles chez des singes vigiles. Du point de vue comportemental, le singe dirige plus vite son regard vers une cible visuelle si celle-ci est accompagnée d'un son. Sur le plan neuronal, la stimulation visuo-auditive induit une diminution d'environ 5 à 10ms les temps de réponse des neurones de l'aire visuelle primaire (V1). Ces résultats démontrent clairement que des neurones d'une aire senso-

rielle primaire peuvent intégrer des informations venant d'une autre modalité sensorielle [Wang et al. 2008]. L'aire V1 n'est donc pas hermétique aux informations provenant du système auditif probablement grâce aux connexions dites « hétéromodales » qui unissent ces deux systèmes [Falchier et al. 2002]. De plus, une étude montre que cette même aire intègre également des signaux du système vestibulaire [Sauvan et Peterhans 1999]. En testant différentes inclinaisons du corps par rapport à l'axe gravitaire, les auteurs montrent que l'activité des neurones sélectifs à l'orientation peuvent être en accord avec l'axe de la gravité.

La présence distribuée de ces modulations au sein des différentes modalités sensorielles remet en question le rôle "unique" du cortex pariétal concernant les transformations de coordonnées mais aussi l'intégration de plusieurs modalités sensorielles. Toutes ces études en amont du cortex pariétal remettent en question cette vision d'un traitement séparé des modalités sensorielles mais aussi du lieu des transformations de coordonnées.

L'aire visuelle primaire semble donc être impliquée dans l'intégration multisensorielle (audition, somesthésie, vestibulaire). Les études au sein du cortex pariétal montrent l'importance du rôle de la position de l'œil dans l'orbite mais aussi de la position de la tête par rapport au corps dans le but d'une représentation unifiée de l'espace pour générer une action (commande de l'œil, de la tête, du bras, etc..).

Nous avons donc recherché si la construction d'une représentation stable et unifiée de l'espace ne commencerait pas dès le début du traitement visuel comme nous laissent présager ces différentes études. Pour y répondre, nous avons recherché l'existence de l'intégration d'un autre signal somesthésique en étudiant l'effet de la position de la tête par rapport au corps au sein du cortex visuel primaire dans une étude électrophysiologique chez le macaque (étude présentée au chapitre 3).

- En aval du cortex pariétal : Les modèles présentés ci-dessus ne sont pas en accord sur le référentiel de sortie du cortex pariétal bien qu'il ait longtemps été considéré comme la dernière étape de la représentation de l'espace. Quelle représentation est utilisé par le SNC pour planifier des mouvements d'atteinte ou de pointage ? (i.e. référentiel). Pour la réponse à cette question, on retrouve principalement les référentiels, oculocentré, main-centré, épaule-centré ou encore craniocentré [Georgopoulos et al. 1986], [Soechting et Flanders 1989b], [Soechting et Flanders 1989a], [Andersen 1997], [McIntyre et al. 1997], [Desmurget et al. 1998], [Graziano 2001], [Cohen et Andersen 2002], [Beurze et al. 2006]... Pourtant, une étude électrophysiologique réalisée dans le cortex moteur avait amené les auteurs à définir un algorithme de décodage neuronal pour la commande du mouvement de la main. Cet algorithme permettait de connaître la direction du mouvement dans un référentiel corps-centré [Georgopoulos et al. 1986]. Même si ce résultat pionnier reste encore admis dans certains modèles [Blohm et al. 2009], d'autres études montrent que ce décodage n'est pas fiable [Wu et Hatsopoulos 2006]. Si on s'intéresse à l'étape intermédiaire entre le cortex pariétal et le cortex moteur, la question du référentiel reste

2. PERCEVOIR POUR AGIR

entière. L'activité des neurones du cortex prémoteur dorsale (PMd) est modulée par la position des yeux [Boussaoud et al. 1998], [Batista et al. 2007] et peut-être par la position de la tête et des parties du corps [Batista et al. 2007]. La seconde étude de cette thèse porte sur l'interprétation de ces résultats au sein de PMd et la proposition d'un modèle basé sur les formalismes de la robotique. Cette étude est présentée au chapitre 4.

2.2 Le robot

A la différence des automates qui ne peuvent réaliser qu'une ou plusieurs séquences déterminées d'opérations sans l'intervention de l'homme, les robots sont des systèmes capables de percevoir, de décider et d'agir. Pour cela, ils doivent être dotés de capteurs, de calculateurs et d'actionneurs. Aujourd'hui les robots sont fortement présents dans le monde industriel et apparaissent de plus en plus dans notre quotidien. Dans l'industrie, ils permettent de réaliser des tâches nécessitant précision, répétabilité et rapidité d'exécution avec une capacité d'adaptation de plus en plus grande, notamment dans les chaînes de montage. Autour de nous, ils prennent des formes de plus en plus diverses allant des simples agents logiciels gérant des interactions avec des serveurs informatiques, à des systèmes mécaniques avancés destinés à aider ou à suppléer l'homme dans l'exécution de tâches difficiles ou fastidieuses. On les trouve dans de très nombreux domaines tels que : l'exploration et l'intervention sur des sites dangereux ou difficiles d'accès, la médecine, avec notamment la micro-chirurgie où la précision de ces systèmes joue un rôle de plus en plus essentiel, mais également l'aide au handicap et l'assistance aux personnes âgées, la robotique de service, l'entretien, etc. (voir Fig. 2.5).

Dans le cadre de cette thèse nous nous intéressons aux robots humanoïdes dont la structure anthropomorphe motive de plus en plus d'interactions entre roboticiens et spécialistes de la boucle perception-action chez l'homme, notamment les biomécaniciens et neuroscientifiques.

2.2.0.1 Différents types de robot

Pour mieux comprendre la spécificité des robots humanoïdes, il est nécessaire de rappeler rapidement quels sont les différents types de robots existants.

Les robots manipulateurs sont les premiers à avoir fait leur apparition, dans les années 50. Ce sont des systèmes polyarticulés reposant sur une base fixe et ayant à leur extrémité un organe terminal destiné à interagir avec l'environnement (pince, outils de travail,...). Ils sont généralement constitués d'une chaîne cinématique simple (succession de corps rigides) ou d'une structure parallèle (mécanisme en chaîne fermée) [Sciavicco et Siciliano 2005]. Ces robots rappellent la structure d'un bras humain avec une épaule fixe et une main à leur extrémité. Pour ces robots, le problème de commande consiste à contrôler le mouvement de l'effecteur en actionnant les liaisons successives du bras pour réaliser une tâche (suivi de trajectoire, préhension, etc.).

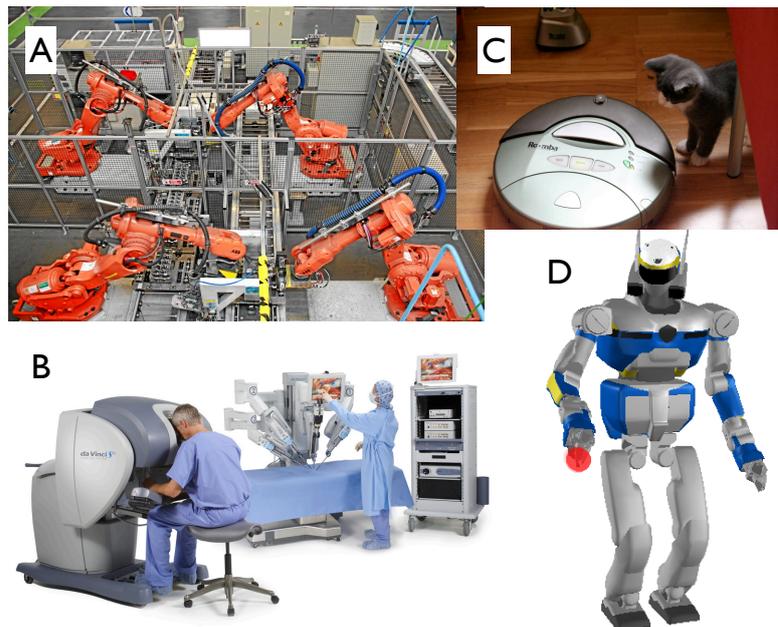


FIGURE 2.5 – Différents types de robots : manipulateur industriel (A), robot médical (B), aspirateur autonome (C), le robot humanoïde HRP2 du LAAS-CNRS (D).

Par opposition à cette première classe de robots, on définit les robots mobiles qui ne sont pas rigidement fixés à un socle et peuvent donc se déplacer dans leur environnement. Cette classe de robot, qui a commencé à apparaître dans les années 70, était initialement constituée par des robots à roues. Elle inclut aujourd'hui des systèmes plus variés tels que les drones, les robots sous-marins, les robots à pattes, les rampants,...

Certains robots combinent les capacités de manipulation et de navigation. C'est le cas des manipulateurs mobiles dont les premiers prototypes combinaient une base mobile à roues et un bras manipulateur à l'instar du robot Hilare représenté à la figure 2.6-A. Le robot PR2 de Willow Garage en est un exemple plus récent qui est muni de deux bras (voir figure 2.6-B). Les robots humanoïdes ont également cette capacité de manipuler des objets et de se déplacer dans leur environnement. Grâce à leur structure anthropomorphe et leur taille voisine de celle de l'homme, ces robots sont destinés à réaliser de plus en plus de tâches qui sont aujourd'hui exécutées par l'homme. Cet argument est mis en avant par les chercheurs japonais, pionniers mondiaux de la robotique humanoïde, qui projettent de développer à brève échéance des robots humanoïdes capables d'aider l'homme dans son travail pour pallier des déséquilibres démographiques liés au vieillissement de la population. La marche bipède, encore peu robuste chez les robots humanoïdes actuels, devrait conférer à ces robots la capacité de se déplacer dans tous types d'environnements humains, à l'opposé des robots à roues qui sont souvent confinés sur des sols horizontaux. D'autre part, la structure arborescente polyarticulée de ces systèmes offre un nombre élevé de degrés de liberté (30 pour le robot HRP2) qui permet d'exécuter des mouvements beaucoup plus complexes que les bras manipulateurs. Cependant, pour conférer à ces robots

2. PERCEVOIR POUR AGIR

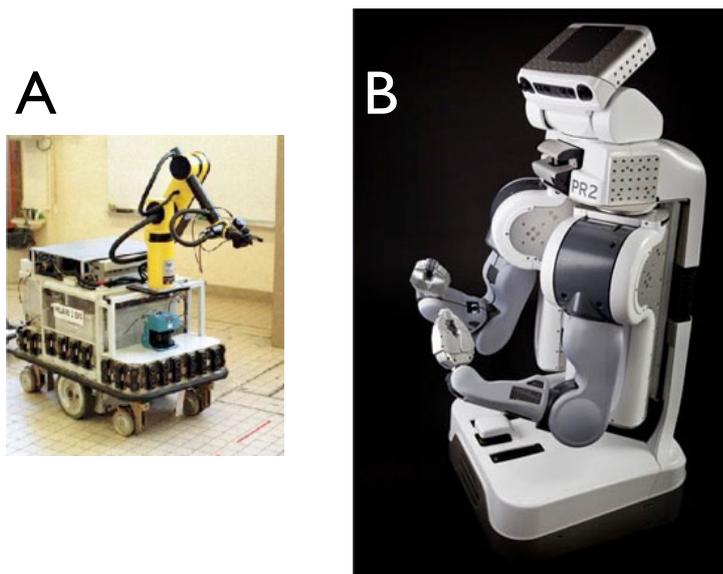


FIGURE 2.6 – Robots à base mobile et équipés d’un ou de deux bras. A-robot Hilare. B-Robot PR2.

des capacités voisines de celles de l’homme, il sera nécessaire de résoudre un ensemble de problèmes difficiles relatif à la perception et à la commande. Comment rendre ces robots capables de traiter et combiner les données capteurs pour parvenir à une perception unifiée de l’environnement ? Comment doter ces robots de capacités motrices leur permettant de relier plans moteurs et boucles réflexes pour contrôler dynamiquement leurs mouvements ? Enfin, comment leur conférer la capacité d’apprendre et de faire des choix pour qu’ils s’adaptent et optimisent leurs performances.

Pour apporter une réponse à ces questions, il est avant tout nécessaire de trouver les solutions technologiques permettant de concevoir les capteurs, les actionneurs et les calculateurs qui conféreront à ces robots des capacités voisines de celles de l’homme. Dans la suite de cette section nous allons décrire les capteurs, les actionneurs et les calculateurs qui équipent les robots d’aujourd’hui.

2.2.0.2 Les capteurs

Comme les organes sensoriels chez l’homme, les capteurs constituent les seules sources d’informations qui renseignent le robot sur son état interne, sur sa situation relative à l’environnement, et sur l’état de l’environnement lui-même. Plus le robot dispose d’informations complémentaires et riches, plus il est capable de réaliser des tâches complexes. On distingue plusieurs types de capteurs.

Les capteurs proprioceptifs permettent de mesurer l’état interne du robot. Il est en effet nécessaire de connaître à chaque instant la position de l’ensemble de ses liaisons et leur vitesse pour pouvoir calculer la commande. Pour cela, chaque articulation motorisée est munie

d'un encodeur incrémental qui mesure précisément son débattement angulaire (pour les liaisons rotoïdes) ou linéaire (pour les liaisons prismatiques). La connaissance de l'orientation des corps, les uns par rapport aux autres, et de leur dimension, permet de reconstruire précisément la configuration du robot et en particulier la situation de ses organes terminaux. La mesure de la variation temporelle de ces données permet à son tour de retrouver les vitesses articulaires et opérationnelles du robot. Ainsi, les mesures proprioceptives peuvent être suffisantes lorsqu'on veut commander le déplacement de l'effecteur le long d'une trajectoire cartésienne.

Les choses se compliquent dès que le robot n'est plus relié à une base fixe. Pour les robots à roues, toutefois, une autre mesure de l'état interne peut dans certains cas être suffisante pour commander un déplacement. La mesure de la rotation totale de chaque roue permet en effet d'estimer le déplacement effectué par le robot. Cette mesure, dite odométrique, offre une première solution pour commander les robots mobiles. Elle est cependant très fragile puisqu'elle diverge très facilement à cause du glissement des roues, des imperfections du sol et des imprécisions mécaniques.

Pour cette raison, il est généralement nécessaire d'utiliser d'autres types de capteurs pour commander les robots mobiles. Dès qu'un robot n'est plus maintenu sur un sol horizontal, une centrale inertielle à six axes est généralement utilisée pour mesurer son orientation par rapport à la verticale gravitaire (utilisation comme inclinomètre) et pour mesurer en ce point les vitesses angulaires et les accélérations linéaires. Ces informations sont indispensables pour la commande des drones et des robots humanoïdes qui sont des systèmes naturellement instables et pour lesquels les effets dynamiques ne peuvent pas être négligés. Notons que la centrale inertielle joue un rôle comparable à celui de l'oreille interne humaine qui est indispensable pour le maintien de la posture verticale et la locomotion, mais également pour d'autres fonctions telle que la stabilisation de la perception visuelle.

Des capteurs extéroceptifs sont également indispensables pour mesurer l'état du robot par rapport à son environnement. Ces capteurs permettent de percevoir l'environnement à distance. Il en existe plusieurs types qui donnent des informations complémentaires, plus ou moins précises et adaptées à des types de tâches différentes. Le capteur de vision est certainement le plus utilisé. Les caméras CCD délivrent une information très riche à une fréquence élevée. Un grand nombre de méthodes ont été développées par les roboticiens pour traiter l'information issue d'une ou plusieurs caméras afin de localiser les éléments de la scène et de les identifier. La stéréovision, qui repose sur l'utilisation simultanée d'une paire de caméras calibrées, permet de remonter à l'information tridimensionnelle à partir de la mesure d'indices visuels dans les deux plans images. Le robot HRP2 par exemple est muni de deux paires de caméras à focales fixes, qui lui permettent d'avoir une vision stéréo en champ proche et en champ lointain.

Pour détecter les obstacles présents dans l'environnement du robot des télémètres sont fréquemment utilisés. Reposant généralement sur la technologie des ultrasons ou du laser, ce type de capteur permet de construire des cartes de proximité à partir de nuages de points d'im-

2. PERCEVOIR POUR AGIR

fact obtenus par balayage en site et en azimut. Cette technologie est très utilisée sur les robots à roues. Elle est par contre moins bien adaptée à la robotique humanoïde car il est très difficile de maintenir le capteur en une configuration à altitude fixe durant le déplacement du robot. On peut également penser que le caractère non anthropomorphe de ce type de capteur n'incite pas les chercheurs à développer son champ d'application en robotique humanoïde.

Les capteurs audios sont pour leur part encore peu utilisés en robotique. Les techniques de localisation de sources sonores et de reconnaissance de signaux commencent à peine à se robustifier. Elles sont apparues beaucoup plus tardivement que les traitements de l'information visuelle. Les méthodes les plus perforantes reposent sur l'utilisation d'antennes, constituées de plusieurs microphones, qui permettent de réaliser un filtrage spatial du signal. Quelques équipes ont commencé à développer des techniques de perception binaurale visant à reproduire l'audition humaine en utilisant seulement deux capteurs. Ces techniques, basées sur la différence en phase et en intensité des signaux perçus par chaque oreille, sont très prometteuses mais encore mal maîtrisées.

Il existe également des capteurs de contact, de glissement et d'effort, qui sont indispensables pour la commande haptique (saisie et manipulation) et la gestion dynamique des contacts. Il est en effet nécessaire, pour la commande des systèmes dynamiques, d'évaluer les couples et les forces qui s'exercent au niveau des différentes articulations. Par exemple, en robotique humanoïde, la mesure des efforts au niveau des chevilles est indispensable pour calculer la position du centre de pression au niveau du pied afin de déterminer le "zero-moment-point" ou ZMP, qui est utilisé dans un grand nombre d'algorithmes de commande de la locomotion. Les mesures d'effort sont également indispensables au niveau des poignets et de la pince pour adapter l'effort à la tâche. Dernièrement, des peaux tactiles (pression et glissement) ont été développées pour les robots humanoïdes [Takei et al. 2010].

2.2.0.3 Les actionneurs

Les actionneurs sont les processus physiques capables de produire le mouvement. Ils exécutent l'ordre donné par la commande et permettent au robot de changer sa configuration. Il en existe différents types : électriques, hydrauliques ou pneumatiques. Sur les robots humanoïdes, chaque degré de liberté est commandé par un actionneur. La plupart des robots humanoïdes actuels sont commandés par des moteurs électriques à courant continu. Cette technologie s'avère très précise et robuste mais elle est coûteuse en énergie et ne procure pas au robot la compliance et l'adaptabilité qui sont deux propriétés essentielles des muscles squelettiques. La conception de muscles artificiels constitue un réel challenge en robotique. Certains prototypes à base de muscles pneumatiques ou chimiques ont été développés [Tondou et Lopez 2000] mais les systèmes obtenus se sont avérés trop instables ou trop lents pour constituer une alternative aux moteurs à courant continu. L'encombrement et l'énergie nécessaires à l'alimen-

tation en fluide constituent un autre inconvénient majeur des actionneurs pneumatiques. Une nouvelle voie basée sur l'utilisation de micro et nano technologies, telles que les polymères électroactifs ioniques, semble aujourd'hui s'ouvrir. Cependant, beaucoup reste encore à faire avant que l'on puisse synthétiser des fibres ayant les propriétés dynamiques voisines de celles des muscles squelettiques humains.

2.2.0.4 Le calculateur

Les robots actuels disposent de calculateurs embarqués qui ont une puissance de calcul comparable aux ordinateurs portables du commerce. A titre d'exemple, le robot HRP2 du LAAS dispose de deux ordinateurs interconnectés. L'un d'eux est principalement dédié au calcul des trajectoires et à l'exécution de la commande, l'autre est utilisé pour le traitement de la perception. Toutefois, bien que la puissance de calcul soit essentielle pour pouvoir prendre en compte un plus grand nombre d'informations, la principale difficulté est de développer une algorithmique performante pour traiter le plus efficacement des données.

Les deux sections suivantes visent à montrer que la question du choix des référentiels, évoquée dans la première partie de ce chapitre dédiée aux neurosciences, se pose également en robotique. Elle apparaît au niveau de la perception, notamment pour la mise en correspondance des données multi-capteurs, mais également au niveau de la commande.

2.2.1 Perception pour la commande

Comme nous venons de le décrire, chaque capteur apporte des informations de nature différente qui sont plus ou moins riches et plus ou moins pertinentes au regard de la tâche à réaliser. Pour cette raison il apparaît nécessaire de mettre en commun ces données complémentaires pour affiner la précision de l'information. En robotique, cependant, les données provenant de chaque capteur sont tout d'abord traitées indépendamment dans le but d'en extraire l'information la plus riche. A cause de la complexité des techniques spécifiques mises en œuvre dans chaque cas, il n'est pas rare que des roboticiens se spécialisent dans le développement et le traitement des données d'un type de capteur particulier. Il existe ainsi des spécialistes de la vision, de la télémétrie, de l'audition, etc., et les communautés correspondantes sont souvent différentes et possèdent leurs propres conférences internationales. Dans chaque cas, l'objectif est de concevoir les techniques les plus élaborées pour extraire la meilleure information de chaque capteur.

La question de la fusion multi-capteurs se pose à un second niveau. Elle vise à combiner les données issues du traitement de chaque capteur pour accroître la qualité de l'information en réduisant les incertitudes et/ou les imprécisions. La fusion multi-capteurs repose sur des techniques d'estimation et de filtrage et met en œuvre des méthodes diverses telles que les approches

2. PERCEVOIR POUR AGIR

probabilistes [Bessière et al. 2008], la logique floue et la théorie de possibilités [Dubois et Prade 1980], la théorie des fonctions de croyances introduite par Dempster Shafer [Shafer 1976], les méthodes non paramétriques [Mitolinos et Thomopoulos 2011], ou encore les réseaux de neurones [Paliwal et Kumar 2009]. Il est important de noter que l'information mesurée par chaque capteur est exprimée dans un référentiel qui lui est propre. Pour la vision, par exemple, on considère souvent le référentiel caméra dont les deux premiers axes sont liés au plan image et le troisième est dirigé dans la direction de l'axe optique. Pour réaliser la fusion des données multi-capteurs il est alors nécessaire d'effectuer des transformations géométriques pour exprimer ces données dans un même système de coordonnées. Il n'existe pas en robotique de théorie particulière ou de méthode visant à standardiser cette mise en commun. Le choix du référentiel dépend généralement de la tâche.

Dans une grande majorité des cas, les informations délivrées par les capteurs sont transformées pour construire une représentation globale de l'environnement et du robot dans un même référentiel allocentré. Dans d'autres cas l'environnement est construit dans un référentiel robot-centré. Dans ce dernier cas le référentiel choisi est soit lié à un élément fixe du robot, soit lié à un capteur jouant un rôle prépondérant pour la tâche [Meilland et al. 2010]. Dans les deux cas, l'environnement et le robot sont représentés dans une même représentation. Différents types de représentations ont été proposés dans la littérature pour décrire l'environnement. On en distingue principalement deux types : les représentations métriques et les représentations topologiques. La première consiste à représenter les éléments perçus et le robot dans un même espace affine dans lequel une distance a été définie. La seconde consiste à discrétiser l'environnement en nœuds ou zones d'intérêt et à considérer les composantes connexes permettant de les relier comme les arcs d'un graphe.

Ces deux approches ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients. Les cartes métriques permettent une détermination précise des zones libres et encombrées, offrant une base d'informations riches pour la planification des déplacements du robot. En revanche, les représentations topologiques n'offrent qu'une description fonctionnelle de l'environnement mais en décrivent simplement la structure. La construction des cartes et leur mise à jour posent un problème difficile. Les premières méthodes de cartographie étaient incrémentales et très sensibles aux erreurs de localisation. Les méthodes actuelles sont beaucoup plus robustes. Le SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) [Durrant-Whyte et Bailey 2006] [Bailey et Durrant-Whyte 2006] consiste à réaliser simultanément la construction de la carte et la localisation du robot. Cette approche repose généralement sur l'utilisation de plusieurs types de capteurs et consiste à faire des inférences itératives sur la base d'un modèle de perception et d'évolution pour localiser le robot et les amers au fur et à mesure du déplacement.

2.2.2 Commande du mouvement

2.2.2.1 Généralités

La commande d'un système robotique est élaborée à partir des théories de l'automatique. Les lois qui régissent le mouvement du robot sont décrites par un système d'équations différentielles qui relient les variables d'état et les variables de commande. Différents niveaux de modélisation peuvent être considérés, selon que l'on souhaite seulement décrire les contraintes cinématiques qui régissent le mouvement des différents corps du robot, ou que l'on veut prendre en compte les contraintes dynamiques reliant l'accélération des variables, les efforts, les masses et les inerties. La représentation d'état n'est pas unique, elle dépend d'un choix particulier de référentiels et de grandeurs. Dans tous les cas, l'état est constitué d'un ensemble minimal de variables à partir duquel les trajectoires du système peuvent être exprimées de manière unique dès lors qu'on connaît l'état initial et la commande appliquée. La plupart des systèmes robotiques sont commandés en vitesse, certains robots peuvent également être commandés en couple. En général, les variables d'état ne sont pas directement mesurables et doivent être reconstruites à partir des variables de sortie, qui dépendent directement des données délivrées par les capteurs, et de la commande. Cette étape de reconstruction, appelée "observation", pose un problème dual de celui de la commande.

Pour les systèmes polyarticulés, le problème de la commande revient à déterminer les variations articulaires permettant de déplacer les différents corps pour effectuer des tâches. Dans cette thèse, les tâches que nous considérons sont des mouvements d'atteinte visuellement guidés. A cette fin, nous supposons que le bassin ou le torse du robot reste fixe, ce qui nous permettra de raisonner sur la commande de chaînes cinématiques simples dont l'une des extrémités est fixe et l'autre, qui constitue l'effecteur, est en mouvement. Pour ce type de système robotique, qui correspond au modèle générique des bras manipulateurs, trois niveaux de modélisation peuvent être considérés.

- Le modèle géométrique décrit la situation (position et orientation) de l'organe terminal en fonction des valeurs angulaires des liaisons successives.
- Le modèle cinématique exprime la vitesse de l'organe terminal dans l'espace opérationnel en fonction de la valeur des variables articulaires et de leur dérivée temporelle.
- Le modèle dynamique exprime les couples articulaires en fonction des variables articulaires et de leur dérivées première et seconde, des masses et inerties ainsi que des frottements et différents efforts mécaniques.

Dans chaque cas, on est amené à considérer une expression directe ou inverse de ces modèles selon le problème considéré.

Pour les robots mobiles, il n'y a pas de base fixe et il est nécessaire d'introduire un référentiel mobile attaché au robot pour repérer sa situation dans l'environnement. Il n'existe pas de règle générale pour déterminer la position et l'orientation de ce référentiel. Celui-ci est

2. PERCEVOIR POUR AGIR

généralement choisi pour des raisons pratiques. Pour les robots mobiles, l'origine du référentiel est généralement placée entre les roues qui génèrent la contrainte non-holonome, avec un axe dirigé dans le sens du mouvement et un autre orthogonal. Pour les drones, le référentiel est généralement centré sur un lieu de symétrie mais décalé par rapport au centre de gravité pour permettre une meilleure expression des couples. Les axes sont dirigés selon la direction d'avancement, la direction de la gravité et leur perpendiculaire commune. Pour les robots humanoïdes le référentiel flottant est généralement placé au niveau du bassin pour simplifier l'expression des différentes chaînes et faciliter l'expression du problème de la locomotion qui est étroitement lié à la position du centre de gravité. Dans tous les cas, ce référentiel est utilisé pour localiser un corps de référence du robot par rapport à l'environnement et sert de base mobile pour la définition des différentes chaînes cinématiques. Ce référentiel joue donc un rôle essentiel lors de l'étape de la planification de mouvements qui consiste à construire les trajectoires du robot par rapport à l'environnement.

2.2.2.2 Méthodes de commande

Les stratégies de commande de robots se répartissent en deux grandes catégories : la commande par retour d'état et la commande référencée-capteur qui ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients.

- La commande par retour d'état consiste à raisonner dans un référentiel allocentré. Les différentes données capteurs sont utilisées pour localiser le robot le plus précisément possible dans son environnement. On planifie alors un chemin géométrique ou une trajectoire (chemin avec loi horaire) admissible, c'est-à-dire sans collision et satisfaisant les contraintes dynamiques du robot. On définit l'erreur à réguler comme l'écart entre la configuration courante du robot et un point de la trajectoire de référence, obtenu par projection. Il s'agit alors de synthétiser une loi de commande en boucle fermée permettant de faire converger cette erreur à zéro et de l'y maintenir de sorte à exécuter le déplacement souhaité. La figure 2.7 décrit un schéma de commande cinématique cartésienne par retour d'état. Ici l'état est la situation absolue de l'effecteur. A chaque instant, l'état désiré X^* est comparé à l'état courant X pour déterminer l'erreur en configuration ε . Cette erreur sert à définir, au travers de la loi de commande, la variation d'état ΔX qui doit être exécutée. Grâce au modèle cinématique inverse, la variation en configuration ΔX est traduite en variation articulaire Δq qui est alors appliquée au robot. Par rétroaction, les encodeurs renseignent le système sur la valeur des articulations q . Le modèle géométrique direct permet ensuite de reconstruire la situation de l'effecteur dans le référentiel de base du robot X_{robot} . Finalement, pour comparer à nouveau l'état du robot, X , à celui désiré, X^* , un changement de coordonnée (représenté par le bloc "Trans") permet d'exprimer la valeur de l'état courant du robot dans le référentiel absolu (allocentré).

L'intérêt majeur de cette approche est qu'elle apporte une solution complète pour exécuter

un mouvement depuis la configuration initiale jusqu'à la configuration finale. Il existe aujourd'hui de nombreux algorithmes de planification qui permettent de trouver une trajectoire admissible pour différents types de robots dans des environnements complexes [Latombe 1991]. Cette approche souffre cependant d'un manque de réactivité. Il est en effet difficile, sur la base de cette stratégie qui sépare le niveau de planification de celui du contrôle, de prendre en compte la présence d'obstacles imprévus. Certains auteurs ont proposé des techniques de déformation de la trajectoire de référence pour pallier ce problème [Lamiriaux et al. 2004]. Cependant, il est en général nécessaire de recalculer une trajectoire dès que l'environnement est modifié. D'autre part, la nécessité de re-localiser le robot par rapport à un référentiel absolu impose un grand nombre de transformations qui sont source d'erreur à cause des imprécisions du modèle.

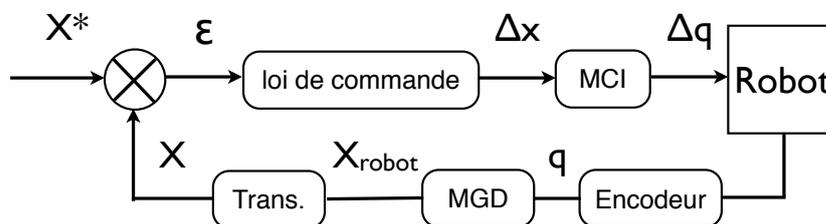


FIGURE 2.7 – Schéma d'une boucle commande cinématique cartésienne dans un référentiel absolu

- La commande référencée-capteur consiste à contrôler le déplacement du robot en régulant des fonctions de sorties directement définies en termes de données capteurs [Samson et al. 1991]. L'idée est de synthétiser des boucles sensorimotrices permettant de commander localement le mouvement du robot. L'erreur à réguler, appelée fonction de tâche, est de dimension inférieure ou égale à celle de l'état du robot, et définie en termes d'un ensemble d'indices sensoriels. L'objectif de la commande est de faire converger la fonction de tâche vers zéro et de l'y maintenir pour garantir l'exécution d'une tâche pouvant contraindre tout ou partie des degrés de liberté du robot. Il ne s'agit donc plus ici d'utiliser les capteurs pour localiser le robot de manière absolue mais plutôt de réguler son déplacement relativement à des amers de la scène. Cette approche a été particulièrement développée pour le capteur de vision, donnant lieu à l'asservissement visuel ou commande référencée-vision. Dans ce cas, les fonctions à réguler peuvent être définies à partir de motifs de l'image ou de données 3D reconstruites. La figure 2.8 représente un schéma de commande cinématique référencée vision. La fonction de tâche e est définie comme l'écart entre la valeur courante d'un vecteur d'indices visuels noté s et la valeur désirée s^* pour que la tâche soit réalisée. La loi de commande permet de déterminer la variation Δx de configuration du robot dans l'espace cartésien qui permet de réduire l'erreur e . A partir du modèle cinématique inverse (MCI) on en déduit la variation articulaire correspondante Δq qui est appliquée au robot. Le capteur de vision fournit alors la nouvelle valeur courante du vecteur d'indices visuels à partir duquel la fonction de tâche sera calculée.

2. PERCEVOIR POUR AGIR

La commande référencée capteur présente l'avantage d'être robuste par rapport aux erreurs de modèle puisqu'elle ne requiert pas la transformation des données dans un référentiel global. Par contre, cette approche est intrinsèquement locale. La régulation d'une fonction de tâche ne permet généralement que l'exécution d'un petit déplacement. Pour commander des déplacements plus longs, il est nécessaire d'enchaîner plusieurs tâches définies par rapport à une séquence d'amers successivement perçus [Souères et al. 2003], [Mansard et Chaumette 2007]. Notons que, dans la plupart des applications, chaque fonction de tâche est définie par rapport à un seul capteur. Il existe cependant quelques travaux proposant l'utilisation de fonctions de tâches hybrides définies à partir de données issues de capteurs différents. Dans [Cadenat 1999] des tâches de navigation d'un robot mobile en environnement contraint sont réalisées à partir de la vision et de données ultrasoniques. Dans [Prats et al. 2007] des mouvements de la main sont contrôlés à partir de la vision et d'un retour de force.

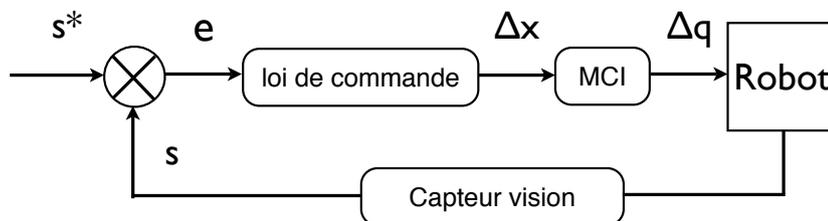


FIGURE 2.8 – Schéma d'une boucle de commande cinématique référencée vision

- La commande des systèmes complexes, tels que les robots humanoïdes, repose parfois sur une combinaison de ces deux approches. Une étape de planification est parfois utilisée pour caractériser une trajectoire au sol, le long de laquelle le robot va se déplacer dans un environnement encombré. Les pas sont ensuite planifiés le long de cette trajectoire. Puis, le mouvement est défini par une pile de tâches visant à réaliser différents objectifs par ordre de priorité en tirant profit de la redondance du système [Samson et al. 1991], [Kanoun 2008], [Mansard et al. 2007]. Il s'agit par exemple de réaliser simultanément, le maintien de la projection du centre de masse ou du centre de pression dans le polygone de sustentation, la verticalité du torse, l'orientation des caméras, un mouvement de la main, etc.

2.3 Conclusion

La première partie de ce chapitre se concentre sur l'état de l'art en neurosciences lié à l'intégration multisensorielle pour la représentation de l'espace. Les modèles basés sur un traitement hiérarchique ne sont plus en accord avec la littérature de ces dernières années. De mêmes, les modèles présentant des transformations de coordonnées de manière sérielle ne sont pas en accord avec les résultats obtenus par diverses études en neurosciences. Un seul modèle semble

être le plus représentatif bien qu'il ne prenne pas en compte les signaux de type vestibulaire. Cependant ce modèle ne prend pas non plus en compte la présence ubiquitaire des signaux de positions des yeux par rapport à la tête tout au long de la boucle sensorimotrice en amont comme en aval du cortex pariétal. La seconde partie de ce chapitre se concentre sur la robotique afin de mettre en évidence que le robot dispose également de capteurs informant sur des types de données différentes et que l'intégration multisensorielle pour la perception n'est pas très développée. Il n'existe pas à ce jour de théorie générale permettant de guider le positionnement des capteurs sur les robots ou de justifier le choix d'une référence spatiale particulière pour la fusion multi-capteurs ou la commande référencée multi-capteurs.

3

Rôle du cortex visuel primaire dans la représentation de l'espace

3.1 Introduction

La représentation de l'espace suppose une mise en correspondance de toutes les informations perçues par notre corps. La région corticale privilégiée pour cette intégration multisensorielle est sans aucun doute le cortex pariétal postérieur où de nombreuses études ont mis en évidence un traitement de haut niveau de différentes modalités sensorielles. De plus, les signaux de positions de l'œil par rapport à la tête et de la tête par rapport au corps semblent y jouer un rôle primordial dans les mécanismes de transformations entre les données exprimées dans les coordonnées oculocentrées, craniocentrées et corps-centrées [Pouget et al. 2002].

De plus en plus d'études montrent que la communication entre les différentes modalités est présente en amont du cortex pariétal. L'activité des neurones de l'aire visuelle primaire (V1) est modulée par des signaux de positions des yeux [Weyand et Malpeli 1993], [Trotter et al. 1992], [Guo et Li 1997] [Trotter et Celebrini 1999]. Des signaux de position de la tête par rapport à la gravité modulent également l'activité des neurones de cette aire [Sauvan et Peterhans 1999]. Il a été proposé que les neurones d'une aire modulés par la position de l'œil le sont également par la position de la tête par rapport au corps [Petit et Beauchamp 2003].

D'autres proposent également que là où l'activité est modulée par la position de la tête par rapport à la gravité alors elle l'est également par rapport au corps [Grüsser et al. 1992]. Il a

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

également été montré qu'une stimulation des muscles du cou par vibration entraîne des illusions visuelles [Biguer et al. 1988], [Gauthier et al. 1990] et [Roll et al. 1991]. Cependant, aucune étude n'a recherché si la position de la tête par rapport au torse module l'activité de l'aire visuelle primaire, ce qui rendrait compte du côté ubiquitaire de l'intégration multisensorielle et des référentiels spatiaux impliqués. Nous proposons, dans ce chapitre, d'étudier l'effet de cette position (tête par rapport au corps) au sein de l'aire visuelle primaire (V1). L'organisation du chapitre est comme suit. La description de notre étude et les matériels et méthodes sont présentées dans les sections 3.2 et 3.3 respectivement. Puis, nous présentons nos résultats dans la section 3.4 avant de conclure dans la section 3.5 sur le rôle du cortex visuel primaire dans la construction de la représentation de l'espace.

3.2 Description de l'étude

Suite à l'observation de l'intégration multisensorielle en amont du cortex pariétal et à son implication dès le début du traitement visuel, nous avons recherché s'il existe, dès l'aire visuelle primaire, un effet modulateur dû à l'orientation de la tête par rapport au corps comme il a été montré chez le singe dans le PPC [Brotchie et al. 1995], [Snyder et al. 1998] ou chez l'homme en IRMf dans une région analogue à LIP [Brotchie et al. 2003]. Il est connu que les champs récepteurs des cellules nerveuses sont attachés au point de fixation, dans le cortex visuel et même dans le cortex pariétal [Andersen et al. 1985]. Cependant, toutes les cellules ne présentent pas un codage rétinotopique. Pour une fixation de l'espace donnée, une partie des neurones du cortex pariétal ne montre pas de déplacement du champs récepteur avec la position des yeux [Galletti et al. 1993], [Duhamel et al. 1997]. Les auteurs concluent alors que les neurones de cette région présentent un codage craniocentré. Dans cette expérience, la tête est maintenue fixe par rapport au corps et à l'écran. [Brotchie et al. 1995] ont fait varier la position des yeux par rapport à la tête et de la tête par rapport au corps. Les auteurs ont ainsi pu mettre en évidence que l'activité visuelle et saccadique des neurones du cortex pariétal est modulée par la position de la tête et de l'œil et concluent que l'activité visuelle est exprimée dans des coordonnées corps-centrées. A la suite de ces travaux, [Snyder et al. 1998] ont mis en place une étude pour différencier si les signaux au sein de l'aire LIP et 7a sont référencés par rapport au corps ou au monde extérieur. Ils ont découvert que les neurones de l'aire LIP sont davantage référencés par rapport au corps qu'au monde et inversement pour les neurones de l'aire 7a. Ces résultats sont en accord avec l'idée que l'aire LIP est impliquée dans le contrôle du regard (œil + tête) et l'aire 7a dans la locomotion. Il existe deux méthodes pour étudier l'effet de la position de la tête par rapport au torse. On peut soit stimuler par vibration les muscles du cou comme dans l'étude réalisée par [Biguer et al. 1988], [Gauthier et al. 1990] et [Roll et al. 1991] soit réaliser une rotation de la tête sur le corps ou du corps sous la tête [Brotchie et al. 1995], [Snyder et al.

1998] [Nagy et Corneil 2010]. En s'appuyant sur ces dernières études au sein du cortex pariétal, nous avons mis au point une étude électrophysiologique pour tester l'effet de modulation due à l'orientation du corps combinée avec l'orientation des yeux dans l'aire V1.

3.3 Etude électrophysiologique : Matériels et méthodes

3.3.1 Protocole

Les protocoles exposés ci-après sont en accord avec la législation française et les recommandations européennes (EUVD 86/609/EEC) sur les soins et l'utilisation des animaux de laboratoire. Nous avons testé trois protocoles différents. Le premier consistait à maintenir le corps fixe et enregistrer l'activité neuronale selon 3 positions différentes de la tête par rapport au corps et, pour chaque position de la tête, 3 directions des yeux différentes. Dans les deux autres protocoles, c'est la tête qui était maintenue fixe. Nous avons enregistré dans un premier temps l'activité neuronale selon trois positions du corps par rapport à la tête et où la direction des yeux étaient maintenue dans le même axe que la tête (droit devant). Puis nous avons testé trois directions des yeux par rapport à la tête selon l'axe horizontal ($-15^\circ / 0^\circ / +15^\circ$) combinées avec trois orientations du corps par rapport à la tête ($-15^\circ / 0^\circ / +15^\circ$) (voir Fig. 3.1). La tête était maintenue fixe par rapport à l'environnement dans ces 9 configurations posturales possibles. A chaque orientation du corps, le singe devait fixer les trois points présentés de manière pseudo-aléatoire et répétés neuf fois chacun. A la suite de l'enregistrement dans les trois orientations du corps, nous avons ré-enregistré l'activité neuronale dans la première configuration du corps (position contrôle) pour tester à posteriori la fiabilité de la réponse neuronale et ainsi valider la qualité de l'activité neuronale. L'enregistrement complet (108 fixations) durait environ vingt à trente minutes en fonction de la rapidité de travail du singe.

3.3.2 Préparation des animaux

3.3.2.1 Acclimatation et entraînement

Sur les 3 macaques initiaux prévus dans notre étude, un seul a été utilisé pour les enregistrements, les deux autres ayant eu des problèmes d'implant de fixation. Ces animaux sont maintenus en captivité dans des cages au sein d'une animalerie conventionnelle. A leur arrivée, ils s'habituent à leur nouvel environnement et expérimentateurs pendant environ un mois. Puis nous commençons à leur apprendre à sortir de leur cage à l'aide d'une canne pour s'installer dans une chaise de travail fabriquée et réglée spécialement pour eux. Même s'ils ont toujours connu le monde de la captivité, ils restent des animaux sauvages. Les singes ne s'opposent que très rarement à leur contention en chaise car ils y reçoivent leurs récompenses, eau et fruits. A partir du moment où l'animal est habitué à la chaise et qu'il ne montre plus de signe de stress,

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

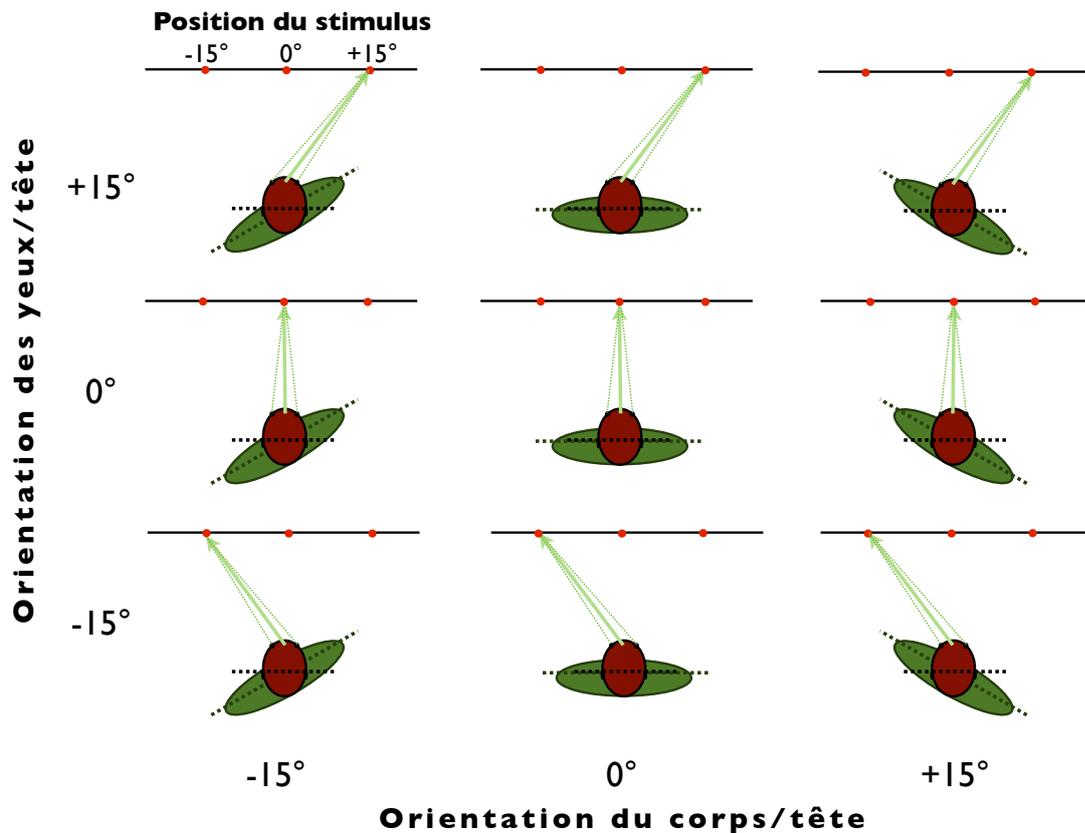


FIGURE 3.1 – Protocole de l'étude. La tête est maintenue fixe par rapport à l'environnement. L'enregistrement électrophysiologique est réalisée dans ces 9 configurations qui sont la combinaison de 3 orientations du corps/tête (-15° , 0° et $+15^\circ$) avec 3 orientations des yeux/tête (-15° , 0° et $+15^\circ$).

nous le familiarisons avec le poste d'expérimentation. La première phase de l'entraînement est de lui apprendre à fixer un point sur l'écran. Pour cela, nous avons besoin de connaître la direction de son regard sur l'écran. C'est le moment de la première chirurgie, décrite dans la section suivante, où un filament isolé fin appelé coil est implantée autour de son œil. Nous commençons par afficher un gros point lumineux sur un écran vidéo pendant plusieurs jours puis on diminue sa taille progressivement avec un allongement du temps de fixation. Une fenêtre angulaire de tolérance de la position de son regard sur l'écran est progressivement diminuée jusqu'à une valeur de $\pm 0.5^\circ$. Après chaque fixation réussie dans les temps imposés (1 à 2 sec.), l'animal reçoit une récompense (une goutte de jus de fruit), et s'arrête lorsqu'il est rassasié au bout de quelques heures. Cette phase d'apprentissage est rapide mais la plus grande difficulté est le maintien de son rythme de travail pendant environ 3 à 4h. Il faut environ deux à trois mois de travail quotidien avant d'arriver à un niveau correct de travail de au moins 100 fixations réussies en quinze minutes. L'étape suivante est la variation de la position du point de fixation (-15° / 0° / $+15^\circ$) dans le plan horizontal, puis un stimulus visuel que l'animal doit apprendre à ne pas

fixer. Enfin, on lui tourne son corps de 15° sur la droite comme sur la gauche. L'entraînement est terminé lorsqu'il maintient son rythme de travail dans toutes les configurations et pendant au minimum trois heures.

3.3.2.2 Chirurgie

Nous avons besoin de maintenir la tête de l'animal fixe ainsi que de connaître la position de son regard sur l'écran vidéo, c'est pourquoi une première chirurgie est réalisée. Lors de cette intervention, le singe est endormi sous anesthésie générale par une induction à la Kétamine (0,10 ml/kg en IM) pour une durée de 15 min puis par une perfusion de Propofol (1/3) dilué dans du glucose 5% (2/3) de manière à contrôler au mieux l'état d'anesthésie de l'animal. Le rythme cardiaque, la saturation de l'hémoglobine en dioxygène et la température corporelle sont contrôlés tout au long de l'intervention qui dure en moyenne cinq heures. Une pièce de fixation est solidarisée avec l'os du crâne par une résine (paladur) et huit vis. Puis le coil est déposé dans le tissu conjonctif et recouvert d'une colle physiologique autour de l'iris d'un des deux yeux. Cette bobine est ensuite prolongée sous la peau jusqu'à l'implant (pièce de fixation + résine) où un connecteur est posé afin de recueillir le signal oculaire (système CNC). Pour assurer une récupération optimale et minimiser les risques d'infection, une période de repos de deux semaines est laissée au singe à la suite de l'intervention chirurgicale. Cette période permet à l'implant de bien se consolider. Un antibiotique (Extenciline) est injecté en IM durant les 3 jours consécutifs à l'opération, et une autre injection est réalisée la semaine suivante. Parallèlement, l'œil est traité avec un collyre antibiotique (Auréomycine 1%) durant trois jours, puis avec un collyre anti-inflammatoire (Chibrocadron) pendant une semaine. A partir du moment où l'animal a fini la phase d'entraînement, nous posons un puits de 2 cm de diamètre sur la surface du crâne au-dessus de l'aire visuelle primaire. Une craniotomie de 8mm de diamètre est ensuite réalisée afin d'introduire des électrodes dans le cortex au travers de la dure-mère pendant la phase d'enregistrement. Une repousse des tissus cicatriciels a lieu et, au bout d'une semaine, ils bloquent la pénétration des électrodes. La solution consiste à réaliser une nouvelle craniotomie pour conserver les tissus frais le plus longtemps possibles. Ces actes ne durent pas plus d'une heure sous Kétamine et Xylazine (0,03 ml/kg).

3.3.3 Chaînes instrumentales

3.3.3.1 Stimulation visuelle

Les caractéristiques et les positions du stimulus et du point de fixation sont définies à l'aide du logiciel Vision Works (Vision Research Graphics). Le point de fixation est un cercle rouge de 12' d'arc et le stimulus est un rectangle de 6° x 6° de points aléatoires dynamiques de 3' d'arc avec une densité de 50% et flashé pendant 500 ms. Les différentes positions de présentation

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

du point de fixation sont $-15^\circ / 0^\circ / +15^\circ$. La position du stimulus par rapport au point de fixation est définie grâce à l'option "mapping" du logiciel Vision Works. Cette dernière nous permet d'afficher un point de fixation au centre de l'écran et de déplacer une barre de longueur, largeur et orientation variables. Lorsque la microélectrode est dans le cortex, on suit l'évolution du signal neuronal à l'oscilloscope et sur un écran d'ordinateur (système Multi Spike Detector MSD) qui nous informe de l'état de réponse neuronale à cette barre présentée. Toutes les conditions sont alors réunies pour connaître la zone du champ visuel qui permet une activation neuronale optimale. La position du stimulus est alors modifiée dans le logiciel. Un code est associé à chaque condition car Vision Works est commandé par REX (Real-time EXperiment) qui gère la présentation préprogrammée des différentes conditions. Une fenêtre de tolérance de $1.2^\circ \times 1.2^\circ$ est utilisée autour du point de fixation dans le but de contrôler la qualité de la direction de son regard tout au long de la présentation.

3.3.3.2 Position de l'animal

L'animal est assis dans sa chaise à primate. Pour tester différentes positions de la tête par rapport au corps, deux solutions sont possibles.

La première est de tourner la tête tout en conservant le corps de l'animal fixe par rapport à sa chaise et à l'environnement. Au début de notre étude, nous avons testé cette solution grâce à un système de rotation que nous avons conçu. Mais, pendant l'entraînement et les premiers enregistrements, le singe a forcé sur le système et créé un jeu mécanique. Ce dernier a entraîné une mauvaise estimation de la direction du regard qui a engendré un refus de travail de l'animal car il n'était plus récompensé à chaque fixation qu'il avait estimée bien réalisée. De plus, même après avoir réparé le mécanisme, nous avons rencontré beaucoup de difficultés à conserver les sites d'enregistrement entre les différentes positions de la tête. Lors des phases de rotation du système mécanique, une rotation manuelle trop rapide ou un mouvement brusque de l'animal entraînait systématiquement la perte du signal bien que le microdescendeur fût fixe par rapport à la tête.

J'ai alors mis en œuvre un système mécanique adapté à la chaise d'origine pour tourner le corps par rapport à la tête. Cette solution a été mise en place lors de l'étude de l'effet de position du cou dans le cortex pariétal par [Snyder et al. 1998]. Les avantages de ce système ont été doubles. L'animal s'est retrouvé sans appui mécanique rigide pendant la rotation de son corps limitant très fortement les vibrations possibles d'un potentiel mouvement de ce dernier au niveau de la tête. De plus on pouvait tester un écart plus important entre la direction de la tête et du corps. Le principe de ce système est que l'animal s'installe sur une base pivotante et que ses épaules sont maintenues dans le même axe que tout le corps sauf la tête qui était alors maintenue fixe par rapport à l'environnement. L'enregistrement des cellules était réalisé en mode passif (comparaison d'activité neuronale entre différentes configurations fixes).

3.3.4 Le signal neuronal

L'activité électrique délivrée par un ou plusieurs neurones sous forme de potentiels d'action (PAs) est captée par une microélectrode en tungstène recouverte d'un isolant (verre ou vernis) et laissée à nue à ses extrémités permettant d'enregistrer l'activité unitaire ou multi-unitaire.

La descente de l'électrode est contrôlée par un microdescendeur (Narishige) qui est maintenu fixe sur le puits et contrôlé en vitesse. Le signal recueilli par l'électrode est amplifié puis filtré à plusieurs reprises (passe-haut, passe-bas, réjecteur). Pour se repérer, le signal est affiché sur un oscilloscope et également converti en son. Ces deux représentations sont essentielles pour le suivi de la descente d'une électrode.

Tout d'abord, on peut entendre le contact de l'électrode avec les tissus et observer le changement de l'allure du signal acquis. La présentation du point de fixation et du stimulus à l'animal est alors mise en route. Après la traversée de la dure-mère, un fond visuel se fait entendre et il ne reste plus qu'à se rapprocher le plus près possible d'un corps cellulaire pour recueillir les PAs émis. Cette dernière phase est la plus délicate et déterminante pour la qualité des enregistrements.

Si la qualité du signal le permet, on isole la signature des PAs captés via le logiciel Multiple Spike Detector (MSD). Il est possible de dissocier la forme de PAs issue d'un neurone par rapport aux autres si le rapport entre le signal et le bruit est assez important. Ce logiciel va calculer six points clés de la forme des signaux que nous avons sélectionnés pour ensuite détecter toutes les formes s'en approchant avec une tolérance variable. C'est alors que pour chaque forme détectée (équivalente à un potentiel d'action), le logiciel envoie un "1" binaire au logiciel REX qui enregistrera dans un fichier l'instant auquel elle a été détectée ainsi que la condition expérimentale.

3.3.5 Représentation graphique

3.3.5.1 Raster et PeriStimulus Time Histogram (PSTH)

Le raster est une présentation classique de l'activité du ou des neurones enregistrés. Chaque ligne représente l'évolution temporelle de la réponse neuronale à la présentation d'un même stimulus. Tous les potentiels d'action détectés sont reportés sur la ligne sous forme de points. Un exemple est présenté dans la partie supérieure de la figure 3.2. En abscisse, le temps relatif à la présentation de la stimulation visuelle est indiqué en milliseconde. Avant la présentation du stimulus ($t < 0$), l'activité est qualifiée de spontanée (AS). L'activité reportée ensuite ($t > 0$) représente l'activité évoquée ajoutée à l'activité spontanée (AES). La figure 3.2 illustre clairement la réponse d'un neurone à un stimulus visuel (rectangle de points aléatoires dynamiques).

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

On notera que les réponses à une même stimulation ne sont pas identiques et présentent une certaine variabilité.

Le PeriStimulus Time Histogram ou PSTH est associé à la présentation de la réponse neuronale sous forme de raster. Une illustration est présentée dans la partie inférieure de la figure 3.2. Il indique le cumul des PAs détectés par une fenêtre temporelle de 5ms par exemple.

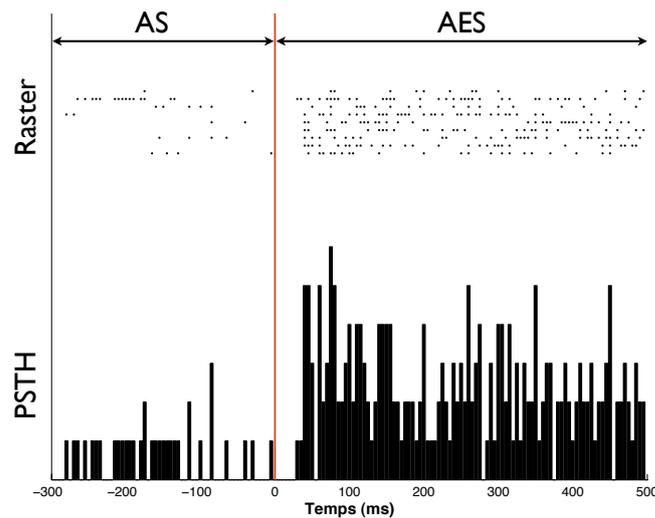


FIGURE 3.2 – Exemple d’activité neuronale pour une condition corps et oeil. La barre rouge représente le moment auquel le stimulus est présenté. L’échelle temporelle en abscisse est définie à partir de cette présentation du stimulus. L’activité enregistrée avant la barre rouge est l’activité spontanée (AS) et l’activité après la barre rouge (i.e. pendant la présentation du stimulus) est l’activité évoquée plus spontanée (AES). Dans la partie supérieure de la figure, on peut voir la représentation de l’activité sous forme de raster. Un point correspond à l’enregistrement d’un potentiel d’action et chaque ligne à la répétition de cette condition (9 fois dans notre protocole). Dans la partie inférieure, nous voyons la même activité mais représentée sous forme de PeriStimulus Time Histogram (PSTH). L’échelle temporelle est discrétisée en intervalle de 5 ms. L’amplitude de chaque barre correspond au nombre de potentiels d’action enregistré sur tous les essais pendant l’intervalle.

3.3.6 Traitement des données

L’analyse statistique a été réalisée à l’aide de la boîte à outils dédiée aux statistiques du logiciel matlab (MATWORKS).

Nous cherchons à montrer l’influence de l’orientation du corps et/ou des yeux sur l’activité enregistrée. Pour cela, nous étudions cette activité selon trois caractéristiques : fréquence de décharge (PA/s) avant la présentation du stimulus (AS), PA/s pendant la présentation du stimulus (AES) et temps (ms) de la latence des réponses au stimulus dont le calcul est présenté dans la section 3.3.6.2. Les activités analysées sont dites “visuelles” lorsque l’activité spontanée

change significativement en présence du stimulus (t-test, p -value > 0.05).

3.3.6.1 Méthode statistique

Deux facteurs extrarétiniens sont manipulés dans cette étude : l'orientation du corps (-15° , 0° et $+15^\circ$) et l'orientation des yeux (-15° , 0° et $+15^\circ$). Un enregistrement se compose de 4 blocs. Un bloc correspond à une orientation du corps où les différentes orientations des yeux sont enregistrées de manière entrelacées (pseudo-aléatoire). Les trois premiers blocs permettent d'enregistrer l'activité des trois orientations du corps. Le dernier bloc (contrôle) est le ré-enregistrement de l'activité neuronale dans la même configuration que le premier bloc. Avant d'analyser les effets liés à l'orientation du corps et/ou des yeux, nous commençons par valider le fait que l'activité au cours de notre enregistrement est fiable. Pour cela, nous testons si l'activité enregistrée dans le premier bloc ne montre pas de différence significative avec celle enregistrée dans le bloc contrôle que ce soit pour l'analyse de l'AS, l'AES ou de la latence. Pour connaître le test statistique à appliquer, nous avons besoin de tester deux sous-hypothèses nulles. La première est que le nombre de potentiels d'action pendant la présentation du stimulus pour la première orientation du corps (premier bloc) et la position contrôle (dernier bloc) suit une distribution normale. Le test de Lilliefors avec un seuil de significativité à 0.05 nous permet de tester cette première sous-hypothèse nulle. Puis, si cette première sous-hypothèse nulle est validée, nous testons la seconde hypothèse nulle. Cette dernière consiste à tester si le nombre de potentiels d'action par seconde pendant la présentation du stimulus dans le premier bloc et le bloc contrôle suit une loi normale de même variance. Le test de Bartlett nous permet de tester cette homogénéité des variances. Pour les cas où la première ou la seconde sous-hypothèse nulle est rejetée, nous analysons nos données en posant l'hypothèse nulle que les deux échantillons (premier bloc et bloc contrôle) suivent des distributions avec la même médiane. Nous appliquons, pour cela, le test non-paramétrique de Friedman (seuil à $p = 0.05$). Dans les cas contraires, nous posons l'hypothèse nulle que les deux échantillons suivent des distributions avec la même moyenne. Nous utilisons alors le test paramétrique de l'Anova à deux facteurs (seuil à $p = 0.05$). En résumé, un enregistrement est considéré statistiquement fiable dès lors que son bloc contrôle ne présente pas de différence significative avec le premier bloc.

A partir du moment où l'activité enregistrée est considérée comme fiable, nous testons par trois analyses les effets liés à l'orientation des yeux et du corps sur l'AS, l'AES et la latence des réponses (voir tableau 3.1). Le premier test, noté test1 dans le tableau 3.1, consiste à comparer l'activité neuronale enregistrée dans les trois premiers blocs (orientation du corps 0° , $+15^\circ$ et -15° / orientation des yeux : -15° , 0° et $+15^\circ$). Le second test (test2) consiste à comparer l'activité selon les mêmes orientations du corps et des yeux que dans le premier test mais

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

	Bloc 1 (0 °)	Bloc 2 (+15 °)	Bloc 3 (-15 °)	Bloc 4 (0 °)
test1	X	X	X	
test2		X	X	X
test3	X	X	X	X

TABLE 3.1 – Répartition des différents blocs dans les trois analyses (test1, test2 et test3) qui permettront de mettre en évidence un ou plusieurs effets sur l’AS, l’AES et/ la latence dus à l’orientation des yeux et/ou du corps. “Bloc 1”, “Bloc 2”, “Bloc 3” et “Bloc 4” correspondent respectivement à l’activité enregistrés lorsque le corps est aligné avec la tête (0 °), orienté vers la droite (+15 °), orienté vers la gauche (-15 °) et encore aligné avec la tête (0 ° - bloc contrôle).

en remplaçant le premier bloc par le bloc contrôle. Finalement, le troisième test consiste à fusionner les activités enregistrés dans le premier bloc et le bloc contrôle puis de comparer cette activité composée de 2×9 essais par orientation des yeux avec celles des orientations du corps à +15 ° (Bloc 2) et à -15 ° (Bloc 3) composées de 9 essais par orientation des yeux. Ces trois analyses consistent à confirmer ou infirmer avec ou sans le bloc contrôle des effets significatifs ou non. Rappelons que la fiabilité de l’enregistrement repose sur une différence non significative et non sur une similitude entre le premier et dernier bloc. Il est possible que les résultats des “test1” et “test2” n’aillent pas dans le même sens. Il est donc important que ces trois tests présentent les mêmes effets ($p < 0.05$) afin de les valider.

Pour ces 9 analyses (3 tests \times 3 caractéristiques (AS, AES et latence)), si la normalité des échantillons et l’homogénéité des variances de ces échantillons sont vérifiées, nous utilisons le test paramétrique de l’Anova à deux facteurs avec un seuil à $p = 0.05$. Dans les cas contraires, nous utilisons le test non-paramétrique de Friedman avec un seuil identique ($p = 0.05$).

Finalement, une dernière analyse peut être réalisée sur les sites dont le bloc contrôle a une activité significativement différente de celle enregistrée pendant le premier bloc. L’enregistrement entrelacé de l’activité pour différentes positions des yeux offre la possibilité de tester si l’activité au sein d’un bloc présente une modulation significative due à l’orientation des yeux. Nous avons donc analysé les enregistrements pour chaque orientation du corps (ou bloc). Si la normalité et l’homogénéité des variances de ces enregistrements étaient vérifiées, nous utilisons le test paramétrique de l’Anova à un facteur. Dans les cas contraires, nous utilisons le test non-paramétrique de Kruskalwallis. Pour cette dernière analyse, une correction de “Bonferroni” est prise en compte et modifie le seuil de significativité à $p_{value} = 0.05/4$ car on a enregistré 4 orientations du corps.

3.3.6.2 Calcul des latences

Pour la latence, nous nous basons sur l’analyse par densité de potentiels d’action décrite dans [Lu et al. 1995]. La latence ne correspond pas obligatoirement au temps pour lequel arrive

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

le premier potentiel d'action pendant l'AES. Il est difficile de distinguer s'il s'agit d'un potentiel d'action spontané ou du premier potentiel d'action lié à la stimulation de la rétine par la présentation du stimulus. Pour résoudre ce problème, nous avons programmé la méthode par analyse de densité des potentiels d'action pour chaque essai afin de conserver la variabilité dans chaque condition. A chaque instant où un potentiel d'action avait été enregistré, nous l'avons remplacé par une courbe de Gauss dont la moyenne correspondait au temps d'arrivée du potentiel d'action. Le profil de densité de potentiels d'action pour chaque essai était la somme de ces courbes de Gauss (voir la courbe bleue dans la figure 3.3 pour exemple) créant ainsi une courbe de densité. A partir de cette courbe de densité, on définit le premier pic dont il existe un point

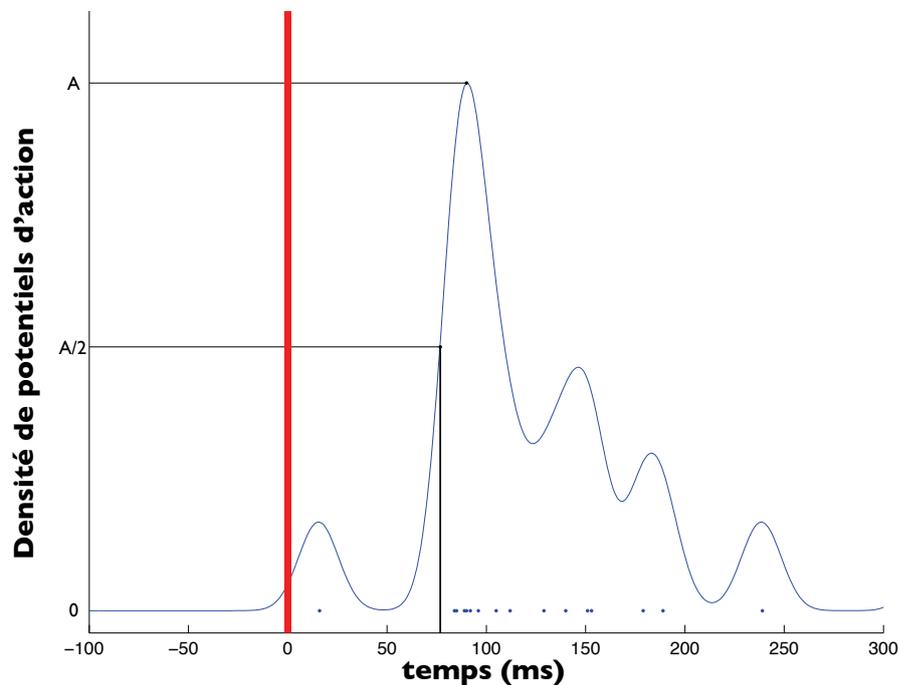


FIGURE 3.3 – Exemple de calcul de la latence d'un essai représenté par les points bleus. La barre rouge correspond au moment où le stimulus est présenté à l'écran. La courbe bleue représente la sommation des courbes de Gauss associées à chaque arrivée de potentiels d'action. L'amplitude du premier pic est noté "A" et sa moitié "A/2" qui définit la latence (81ms dans cet exemple). Cette courbe de densité de potentiels d'action est réalisée à partir de gaussienne d'écart-type 7 (voir texte).

appartenant à la courbe ayant pour amplitude la moitié de celle du pic ("A/2" dans l'illustration, voir figure 3.3) et dont le repère temporel, à ce point, est supérieur à 20ms (latence la plus courte enregistrée dans V1 [Maunsell et Gibson 1992]). Ce repère devient alors notre indice de latence pour cet essai. En fonction de la valeur de l'écart-type σ utilisée pour les courbes de Gauss, cette latence peut varier légèrement. Dans l'exemple de notre site multi-unitaire (voir figure 3.3), si la valeur σ est égale à 7 alors la latence est de 81ms. Pour un σ égale à 5 ou 10,

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

la latence est de 82 ou 78ms respectivement. La valeur du σ dépend surtout du niveau d'activité et de la présence plus ou moins forte de l'activité spontanée. La valeur de $\sigma = 7$ est à posteriori la valeur la plus adéquate pour calculer la valeur des latences pour nos enregistrements.

3.4 Résultats

Dans notre étude, le nombre de sites enregistrés associé à la fiabilité de l'activité ne nous permet pas de présenter des résultats de manière quantitative, mais de manière qualitative. Cette étude électrophysiologique, chez le singe vigile, a permis d'enregistrer 36 sites : 13 neurones isolés et 23 sites multi-unitaires. Tous ces enregistrements sont issus de la partie dorsale de l'aire visuelle primaire de l'hémisphère droit d'un macaque rhésus.

3.4.1 Effet des différents facteurs modulateurs

Nous rapportons et illustrons l'ensemble des effets significatifs dus à l'orientation du corps puis, à l'orientation des yeux et finalement, à la combinaison des deux.

3.4.1.1 Effet de l'orientation du corps

Le principal facteur extra-rétinien qui nous importe, dans cette étude, est l'orientation du corps par rapport à la tête. La variation de ce facteur (-15° , 0° et $+15^\circ$) affecte le niveau d'activité évoquée plus spontanée moyen ou médian ainsi que la latence médiane de plusieurs sites. Le nombre total de ces sites ainsi que la répartition entre les enregistrements unitaires et multi-unitaires sont présentés dans le tableau 3.2.

site	AES	Latence
unitaire	0	1
multi-unitaire	3	3
TOTAL (n sur N)	3 sur 8	4 sur 12

TABLE 3.2 – Répartition des sites modulés significativement par l'orientation du corps. “n” est le nombre total de sites affectés par l'orientation du corps et “N” est le nombre total de sites présentant un contrôle fiable.

Aucun site ne présente une AS modulée par l'orientation du corps. En revanche, des modulations dues à ce facteur extra-rétinien sont relevées pendant l'AES ou sur les latences. Ce sont au total 7 sites qui présentent une modulation significative due à l'orientation horizontale du corps/tête.

a) Modulation de l'AES :

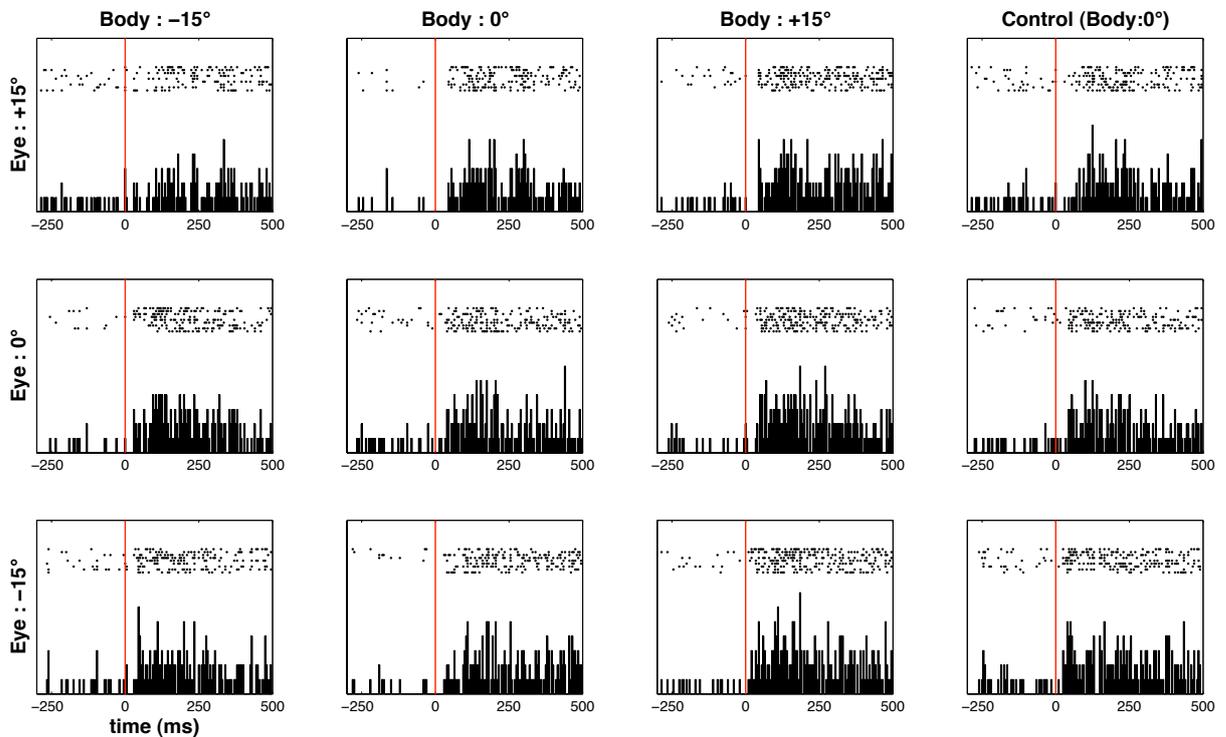


FIGURE 3.4 – Activité du site multi-unitaire dont l'AES est modulée significativement par l'orientation du corps (Anova à deux facteurs, $p < 0.05$). Les trois rangées correspondent aux trois orientations des yeux testées (-15° , 0° et $+15^\circ$). Les trois premières colonnes sont les différentes orientations du corps testées (-15° , 0° et $+15^\circ$). La dernière colonne correspond à l'enregistrement de la condition contrôle (0°). La barre verticale rouge indique le moment d'apparition du stimulus à l'écran.

Parmi les 3 sites multi-unitaires dont l'AES est modulée par l'orientation du corps, 2 d'entre eux ont une préférence pour l'orientation du corps à $+15^\circ$. Cette préférence se traduit par une fréquence de décharge (PA/s) plus élevée que pour les autres orientations du corps. Un exemple de l'un d'eux, est présenté sous forme de raster et PSTH dans la figure 3.4. Le niveau d'activité moyen de ce site est rapporté en fonction de l'orientation des yeux et du corps dans les figures 3.5-A et 3.5-B, respectivement. La figure 3.5-C montre, quant à elle, les activités moyennes enregistrées au début "First Body/Head" et à la fin "Last Body/Head" de l'enregistrement où les axes du corps et de la tête étaient alignés (orientation du corps à 0°). Comme l'illustre la figure 3.5-C, l'hypothèse nulle d'une différence significative entre la première condition corps et la condition contrôle est rejetée (Anova à deux facteurs, $p > 0.05$). L'enregistrement est donc considéré fiable. Cet enregistrement multi-unitaire montre une activité significative plus soutenue lorsque le corps est orienté vers la droite ($+15^\circ$) versus au centre (0°) ou à gauche (-15°) (Anova à deux facteurs, $p < 0.05$). Cet effet significatif dû à l'orientation du corps se voit par une différence d'amplitude entre la courbe bleue et les deux autres courbes sur la figure 3.5-A.

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

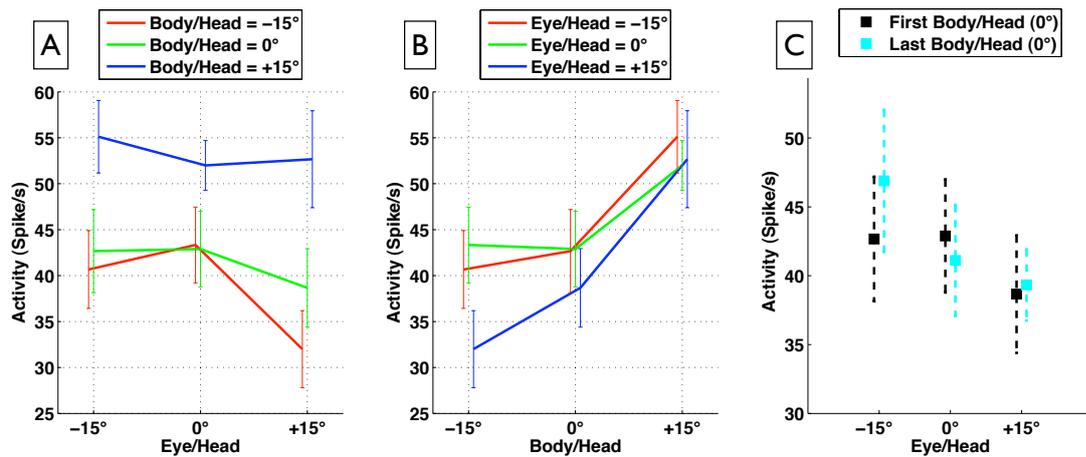


FIGURE 3.5 – Activité moyenne et erreur standard du site multi-unitaire (fig. 3.4) dont l’AES est modulée significativement par l’orientation du corps (Anova à deux facteurs, $p < 0.05$). La figure A présente les différents niveaux d’activités moyens pour chaque condition en fonction de l’orientation des yeux. La figure B illustre la même activité moyenne mais en fonction de l’orientation du corps. La figure C illustre la fiabilité de l’enregistrement (Anova à deux facteurs, $p > 0.05$) en montrant les deux enregistrements pour la même orientation du corps (0°) réalisés au début et à la fin du protocole.

Ce même effet est également visible sur la figure 3.5-B par l’augmentation du niveau d’activité pour l’orientation du corps vers la droite ($+15^\circ$) et ce, pour les trois orientations des yeux.

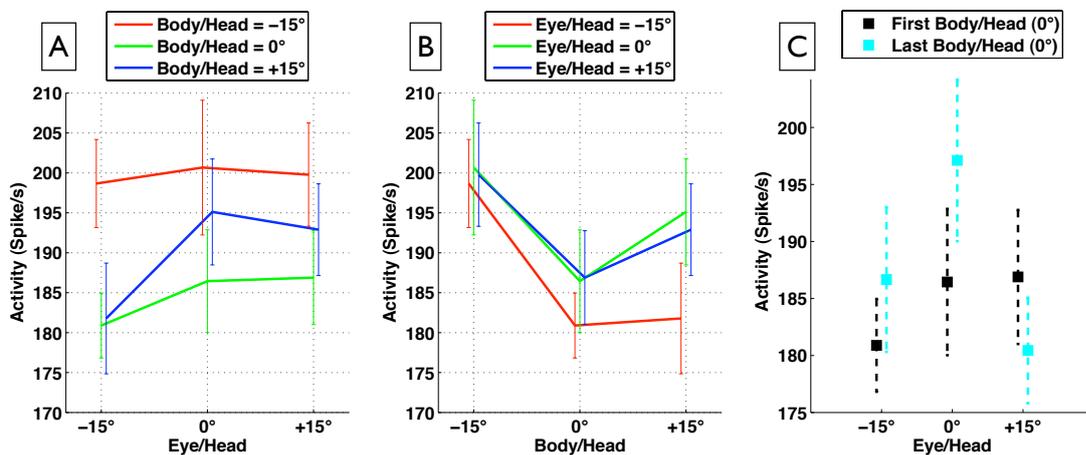


FIGURE 3.6 – Activité moyenne et erreur standard pour chaque condition de l’enregistrement d’un autre site multi-unitaire. L’AES de ce dernier est modulée significativement par l’orientation du corps (Anova à deux facteurs, $p < 0.05$). Légende des figures A, B et C id. figure 3.5.

Un second exemple de modulation significative de l’AES est relevé sur un site multi-unitaire pour une orientation du corps à -15° (Anova à deux facteurs, $p < 0.05$). L’activité de ce site est

présentée dans les trois figures 3.6-A, 3.6-B et 3.6-C. La figure 3.6-C présente l'activité enregistrée dans la première condition corps et dans la condition contrôle. Cette figure montre la fiabilité de cet enregistrement. L'analyse globale révèle que cet enregistrement présente un niveau d'AES significativement différent entre l'orientation du corps vers la gauche (-15°) et l'orientation du corps alignée avec la tête (0°). L'analyse statistique du deuxième test qui consiste à comparer les différents niveaux d'activité entre l'orientation du corps à gauche, l'orientation du corps à droite et la condition contrôle est moins forte en terme de significativité : $p_{test1} = 0.0169$, $p_{test2} = 0.0488$ et $p_{test3} = 0.0285$. On peut s'y attendre puisque l'activité est légèrement plus forte dans la condition contrôle lorsque les yeux sont orientés à -15° et 0° (voir fig. 3.6-C).

b) Modulation de la latence :

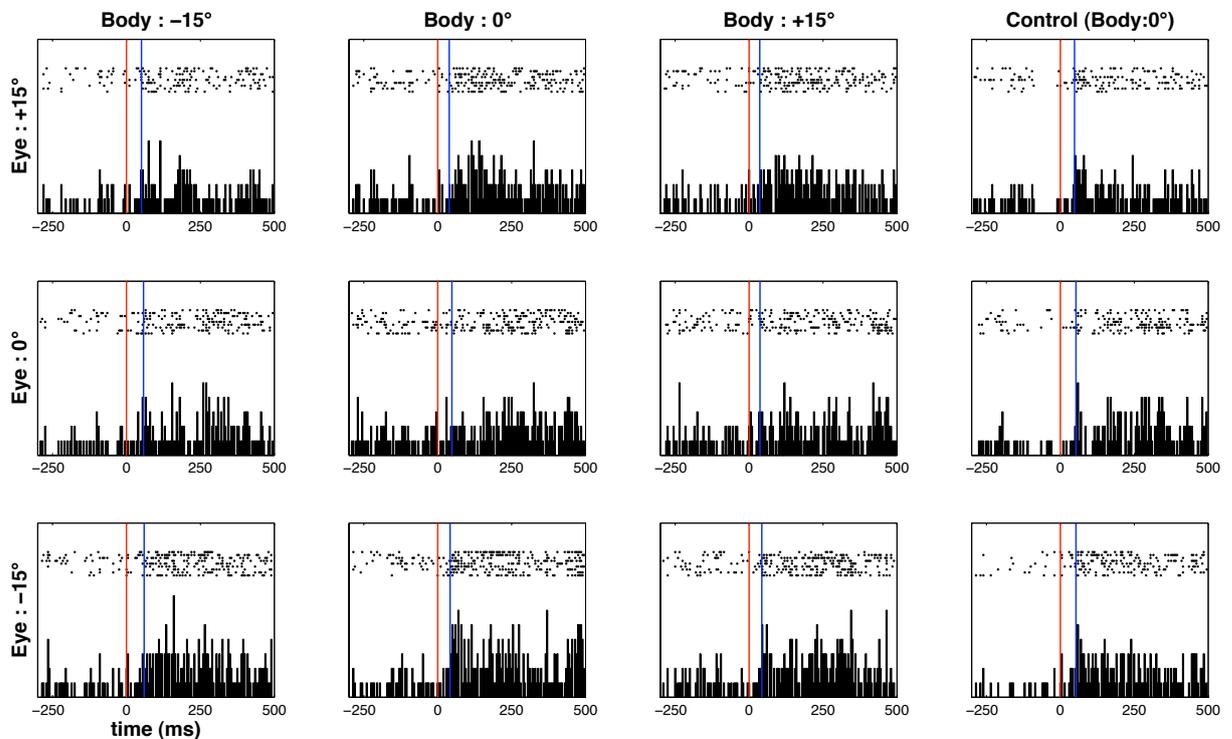


FIGURE 3.7 – Activité d'un neurone isolé dont les latences sont modulées significativement par l'orientation du corps (Friedman, $p < 0.05$). Même légende que dans figure 3.4. La barre bleue illustre la latence médiane liée à la présentation du stimulus.

Notre analyse générale met également en évidence que 3 autres sites ont leurs latences modulées significativement par l'orientation du corps seule. Un de ces sites est unitaire. L'activité de ce neurone est illustrée sous forme de raster et PSTH où la médiane des latences est représentée par une barre verticale bleue dans la figure 3.7. L'hypothèse nulle que les latences pour la première condition corps et la condition contrôle soient significativement différentes est rejetée (Friedman, $p > 0.05$). La distribution des latences pour ces deux conditions est présentée

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

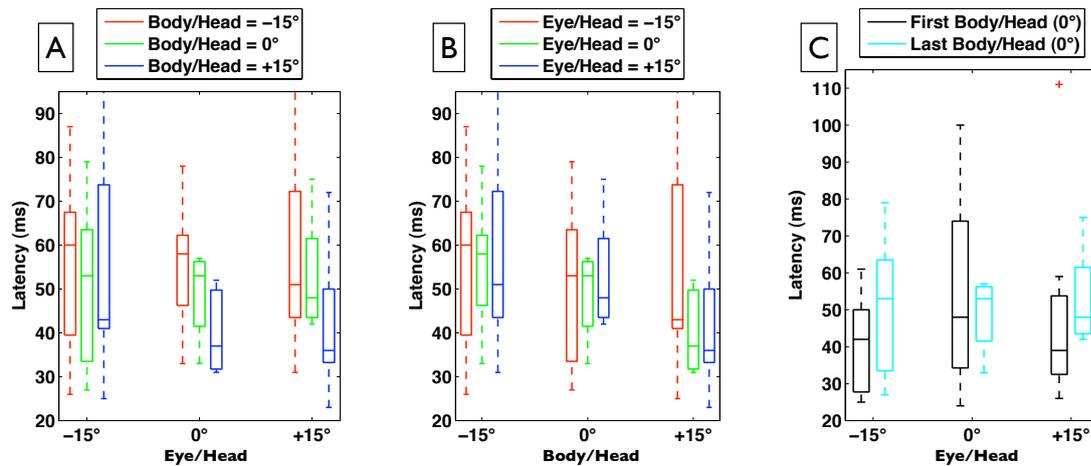


FIGURE 3.8 – Latences du neurone, présenté dans la figure 3.7, modulées par l'orientation du corps (Friedman, $p < 0.05$). La figure A présente les différentes latences pour chaque condition en fonction de l'orientation des yeux. La figure B illustre les mêmes latences mais en fonction de l'orientation du corps. La figure C illustre la fiabilité de l'enregistrement (Friedman, $p > 0.05$) en montrant les deux enregistrements pour la même orientation du corps (0°) réalisés en premier et en dernier.

dans la figure 3.8-C. Les latences calculées dans toutes les conditions pour ce même neurone sont résumées par leur distribution dans la représentation sous forme de boxplot des figures 3.8-A, 3.8-B et 3.8-C. Les figures 3.8-A et 3.8-B illustrent la distribution des latences en fonction de l'orientation des yeux et du corps, respectivement. Bien qu'il y ait une variabilité assez importante, notre analyse sur l'indice de latence révèle une réponse significativement plus courte lorsque le corps est orienté vers la droite ($+15^\circ$) que vers la gauche (-15°) (Friedman, $p < 0.05$). Les différences temporelles des réponses entre ces deux orientations de corps ($+15^\circ$ et -15°) sont de 15, 11 et 17ms lorsque les yeux sont orientés à $+15^\circ$, 0° et -15° , respectivement.

Les deux autres sites dont les latences sont modulées par la position du corps sont multi-unitaires. L'activité de l'un de ces deux sites et la latence médiane pour chaque condition sont illustrées à la figure 3.9. On peut noter que, pour ce site, le contrôle de l'AES et le contrôle des latences sont fiables (Friedman, $p > 0.05$). L'illustration des latences sous forme de boîtes à moustaches est présentée figure 3.10. On y observe que les latences sont les plus courtes lorsque le corps est orienté vers la gauche (boxplot rouge sur la figure 3.10-A ; Latences médianes de -15° à $+15^\circ$: 46, 53 et 45ms). Les latences les plus longues sont relevées lorsque le corps est aligné avec la tête (boxplot vert sur la figure 3.10-A ; Latences médianes de -15° à $+15^\circ$: 62, 70 et 68ms). Les différences temporelles des réponses entre ces deux orientations de corps (-15° et 0°) sont de 16, 17 et 23ms lorsque les yeux sont orientés à $+15^\circ$, 0° et -15° , respectivement. Les figures 3.11-A, 3.11-B et 3.11-C illustrent par un exemple (orientation des yeux à -15°) cette différence significative (Friedman, $p < 0.05$). En effet, la figure 3.11-

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

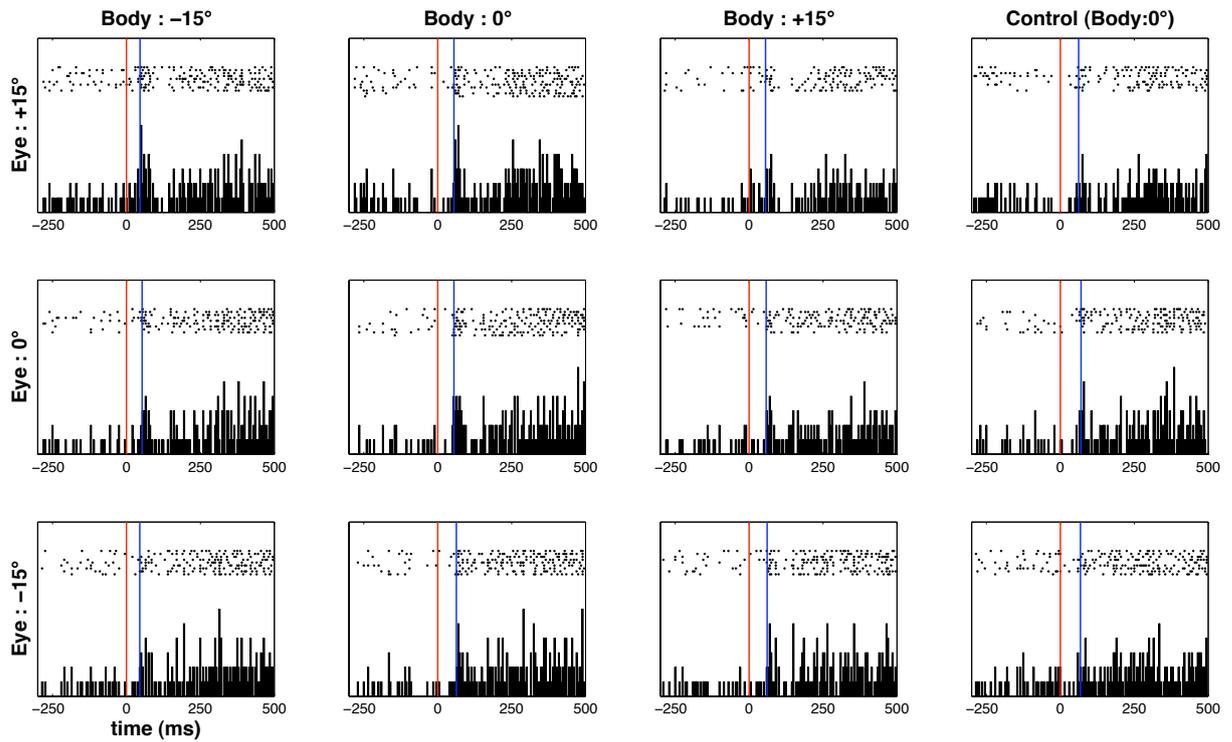


FIGURE 3.9 – Activité d’un site multi-unitaire dont les latences sont modulées significativement par l’orientation du corps (Friedman, $p < 0.05$). Même légende que dans la figure 3.7.

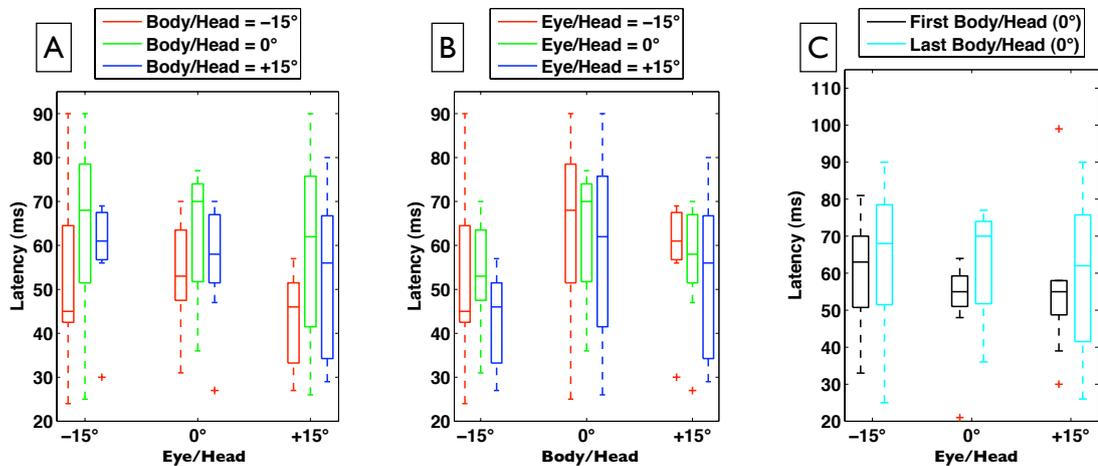


FIGURE 3.10 – Latences du site multi-unitaire présenté dans la figure 3.9. La figure A et B illustrent la modulation significative due à l’orientation du corps (Friedman, $p < 0.05$). Même légende que dans 3.8

A montre l’activité et la latence médiane calculée pour la condition du corps orienté vers la gauche (-15°) et les yeux orientés vers la gauche également. Dans cette dernière condition le stimulus est donc présenté en face du corps. La figure 3.11-B montre également l’activité et la latence médiane calculées mais pour la condition du corps alignée avec l’axe de la tête (0°) et les yeux toujours orientés vers la gauche. Dans cette dernière condition le stimulus n’est

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

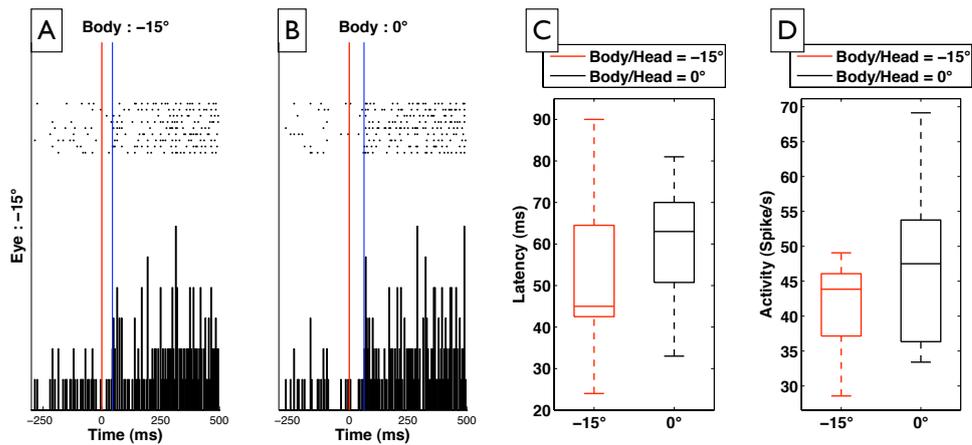


FIGURE 3.11 – Illustration de la différence de latence la plus élevée entre deux orientations du corps pour le site multi-unitaire présenté dans les figures 3.9 et 3.10. Pour une même orientation des yeux (-15°), la figure A illustre la condition du corps à -15° et la figure B celle à 0° . La figure C présente la distribution des latences pour ces deux orientations du corps. On observe ici une différence de 23ms sur la latence médiane. En D est représentée la distribution des niveaux d'activité évoquée.

donc plus présenté en face du corps. La comparaison entre ces deux conditions est résumée par la répartition des latences calculées pour chaque essai dans la figure 3.11-C où l'on peut observer une différence sur la latence médiane de 23ms, alors que le niveau d'activité médian est similaire (voir fig. 3.11-D).

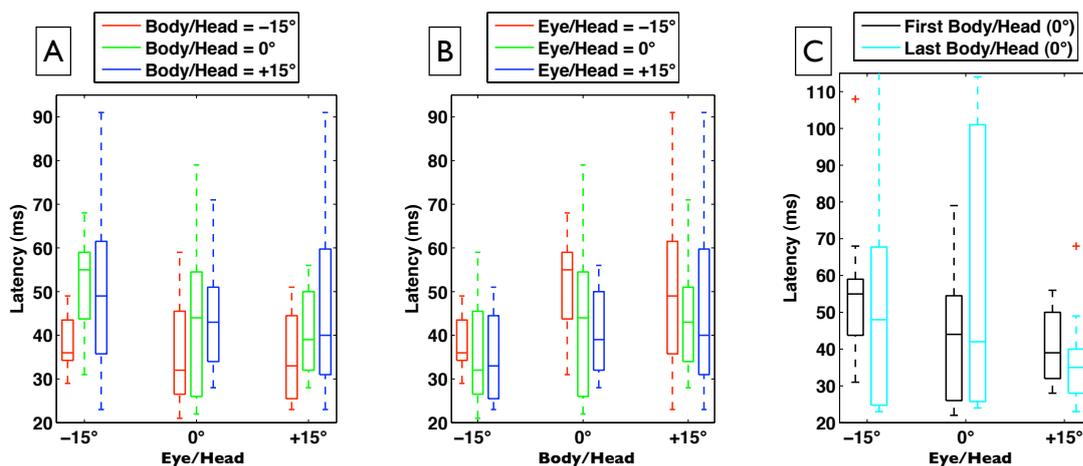


FIGURE 3.12 – Latences d'un second site multi-unitaire qui sont modulées significativement par l'orientation du corps (Friedman, $p < 0.05$). Même légende que dans la figure 3.8.

Le second site multi-unitaire montre également une modulation significative sur les latences où celles-ci sont plus courtes lorsque le corps est orienté vers la gauche (-15° ; Latence médiane de -15° à $+15^\circ$: 36, 32 et 33ms) versus la droite ou au centre (Friedman, $p < 0.05$;

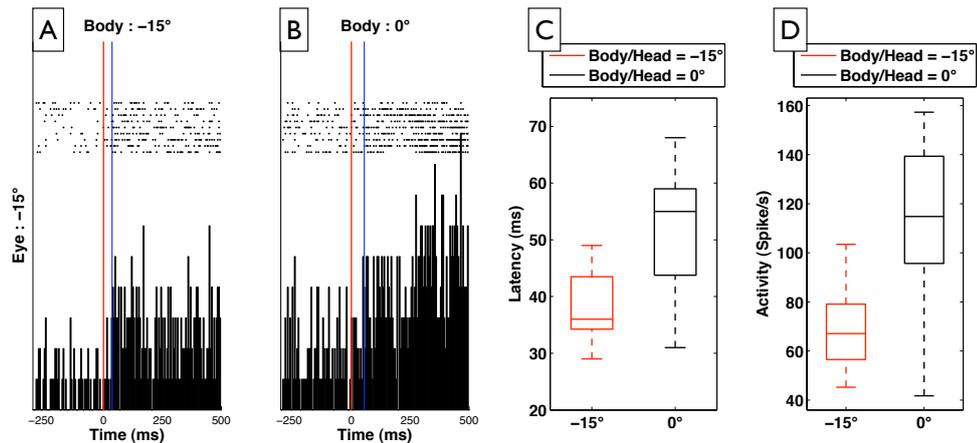


FIGURE 3.13 – Illustration de la différence de latence la plus élevée entre deux orientations du corps du site multi-unitaire présenté dans la figure 3.12. Pour une même orientation des yeux (-15°), la figure A illustre la condition du corps à -15° et la figure B celle à 0° . La figure C présente la distribution des latences pour ces deux conditions. On observe ici une différence de 19ms sur la latence médiane. En D est représentée la distribution des activités évoquées correspondantes.

Latence médiane pour le corps au centre 0° et les yeux de -15° à $+15^\circ$: 55, 44 et 39 ms). Les latences calculées pour ce site sont résumées dans les figures 3.12-A, 3.12-B et 3.12-C. Ce site présente une fiabilité sur les latences entre la première condition et condition contrôle (Friedman, $p > 0.05$) confirmant ainsi l'enregistrement comme fiable (voir fig. 3.12-C). Les figures 3.12-A, 3.12-B illustrent les latences en fonction de l'orientation des yeux et du corps. On y observe principalement dans la figure 3.12-A le raccourcissement des latences lorsque le corps est orienté vers la gauche (boxplot rouge). La plus grande différence significative apparaît entre deux conditions du corps/tête (-15° et 0°) pour une même orientation des yeux/tête (-15°). Ces deux conditions sont illustrées dans les figures 3.13-A et 3.13-B. La distribution des latences dans ces deux conditions est présentée dans la figure 3.13-C où l'on observe clairement une différence de 19ms sur la médiane. La latence médiane la plus courte (36ms) est observée pour le niveau d'activité médian le plus bas (67 Pa/s à -15° versus 104 Pa/s pour 0°)

Au travers de ces sites enregistrés, l'orientation du corps apparaît donc jouer un rôle sur l'activité neuronale au sein de V1, que ce soit sur l'AES ou la latence.

3.4.1.2 Effet de l'orientation des yeux

Le second facteur extra-rétinien dont on peut observer l'impact sur le niveau de l'activité neuronale est l'orientation des yeux par rapport à la tête. Nous avons relevé dans l'analyse générale et l'analyse intra-bloc que ce facteur agit sur le niveau d'activité avant et pendant la présentation du stimulus ainsi que sur la latence des réponses (voir tableau 3.3). Ce tableau 3.3

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

présente la répartition entre les sites unitaires et multi-unitaires pour les deux analyses.

	site	AS	AES	Latence
Analyse globale	unitaire	1	0	0
	multi-unitaire	1	0	0
	sous-total (n sur N)	2 sur 11	0 sur 8	0 sur 12
Analyse intra-bloc par pos. corps	unitaire	0	8	1
	multi-unitaire	2	8	4
	sous-total	2	16	5

TABLE 3.3 – Répartition des sites modulés significativement par l’orientation des yeux pour l’analyse générale puis pour l’analyse intra-bloc (position de corps/position de corps). “n” est le nombre total de sites modulés par l’orientation des yeux et “N” est le nombre total de sites présentant un contrôle fiable.

a) Modulation de l’AS :

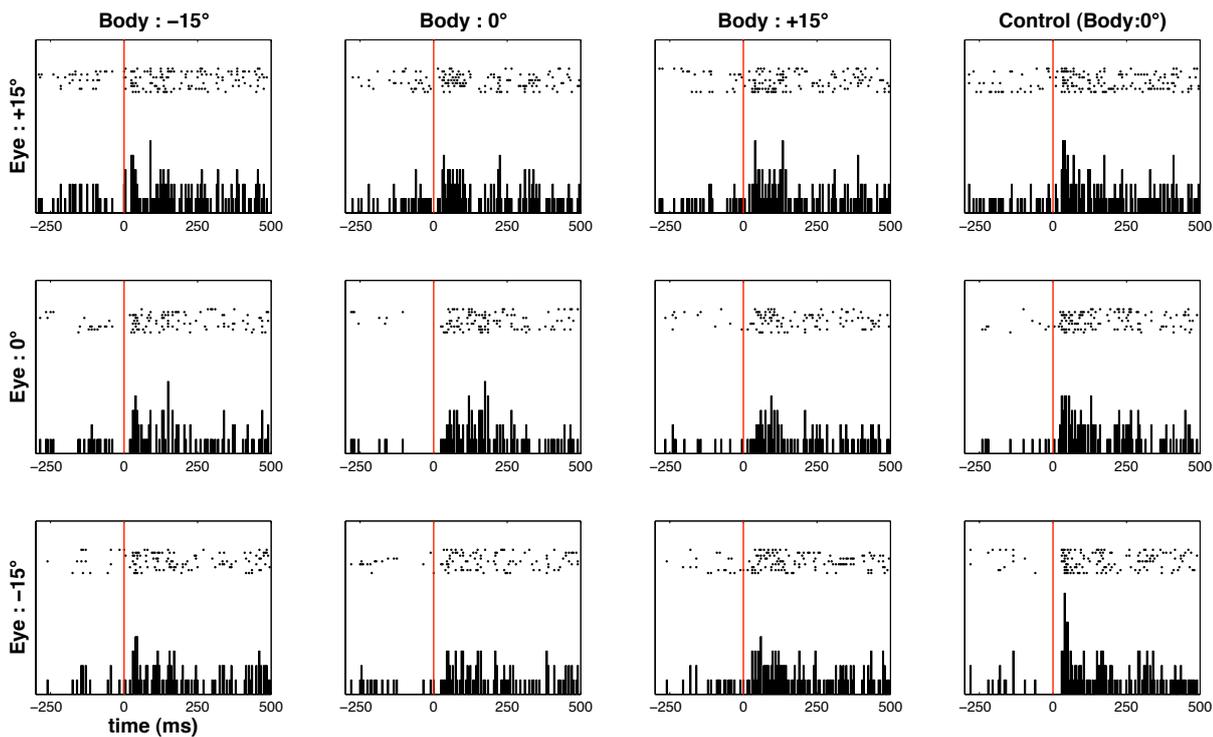


FIGURE 3.14 – Exemple d’activité d’un neurone isolé dont l’AS est modulée significativement par l’orientation des yeux (Friedman, $p < 0.05$). Même légende que dans la figure 3.4

Un exemple d’activité de neurone isolé dont l’AS est significativement modulée par l’orientation des yeux (Friedman, $p < 0.05$) est présenté sous forme de raster et PSTH dans la figure 3.14. Ce neurone présente un bon contrôle sur le niveau d’AS (Friedman, $p > 0.05$). L’AS pour la première condition et la condition contrôle est montrée figure 3.15-C. Sur la présentation

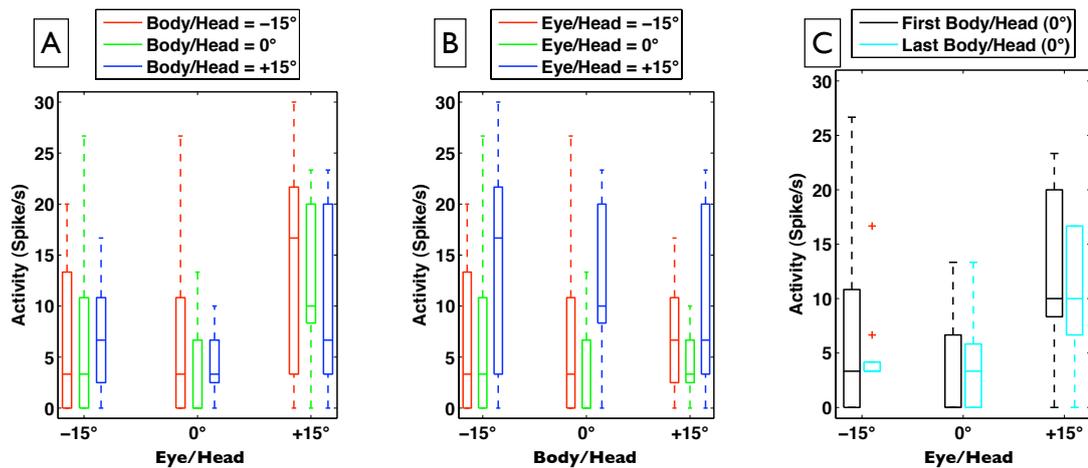


FIGURE 3.15 – Activité spontanée du neurone présentée figure 3.14 et modulée par la position des yeux (Friedman, $p < 0.05$). Un boxplot représente l'activité pour une condition (œil et corps). La figure A présente le niveau d'activité spontanée en fonction de l'orientation des yeux. La figure B illustre l'activité spontanée du même neurone mais en fonction de l'orientation du corps. On observe clairement sur la figure A que le niveau d'activité spontanée est plus élevé lorsque les yeux sont orientés vers la droite et ce indépendamment de l'orientation du corps. On retrouve cette observation sur la figure B où les boxplot bleus, correspondant à une orientation des yeux à $+15^\circ$ montrent une activité plus soutenue par rapport aux autres conditions. La figure C illustre la fiabilité de l'enregistrement de ce neurone sur l'AS.

sous forme de raster et PSTH (voir fig. 3.14, on peut observer que l'AS de ce neurone est plus faible pour les orientations des yeux à 0° et -15° par rapport à l'orientation des yeux à $+15^\circ$. Les différents niveaux d'AS sont montrés dans les figure 3.15-A et 3.15-B. L'effet de l'orientation des yeux sur l'AS de ce neurone est représenté sur la figure 3.15-A par un niveau plus élevé lorsque les yeux sont orientés vers la droite ($+15^\circ$) par rapport à la tête. Ce même effet est visible sur la figure 3.15-B puisque les boxplot bleus (“Eye/Head = $+15^\circ$ ”) montrent un niveau plus élevé dans les trois orientations du corps. On observe cependant qu'il n'y a pas de différence du niveau d'AS en termes de médiane pour les conditions d'orientations des yeux/tête à -15° et $+15^\circ$ lorsque le corps est orienté de $+15^\circ$. Cette dernière observation suggère qu'il existe peut être une interaction entre l'orientation du corps et des yeux sur l'AS de ce neurone que l'on ne peut malheureusement pas valider d'un point de vue statistique due à l'utilisation de test non-paramétrique (Friedman's test).

Un autre exemple de modulation significative de l'AS (Kruskalwallis, $p < 0.05$) est montré dans la figure 3.16. Il s'agit d'un effet intra-bloc. Cette illustration sous forme de raster et PSTH illustre une diminution de l'AS enregistrée d'un site multi-unitaire lorsque le corps est orienté vers la droite ($+15^\circ$) (Friedman, $p < 0.05$).

b) Modulation de l'AES :

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

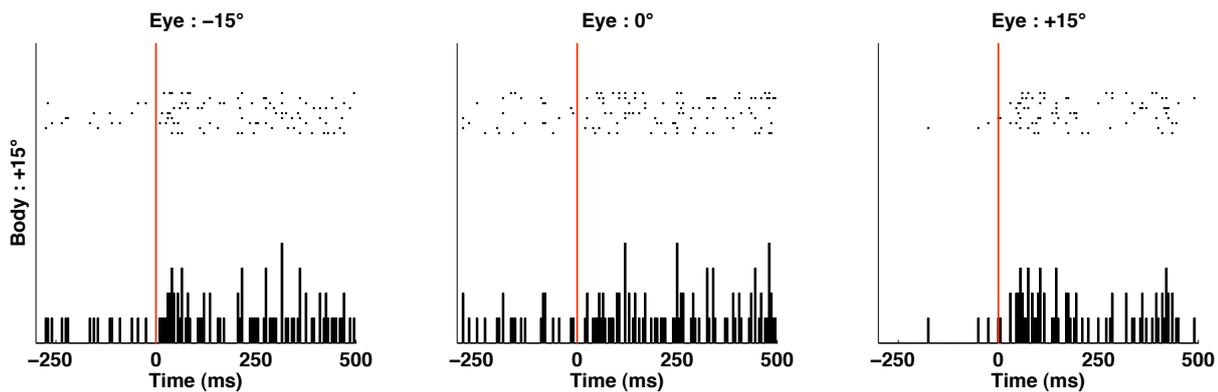


FIGURE 3.16 – Activité d’un site multi-unitaire dont l’AS est modulée significativement par l’orientation des yeux pour l’orientation du corps à $+15^\circ$ (Friedman, $p < 0.05$).

L’orientation des yeux module également le niveau d’activité enregistrée pendant la présentation du stimulus. L’analyse intra-bloc, nous permet de mettre en évidence que ce facteur agit sur le niveau d’AES.

Un exemple d’AES d’un neurone mettant en évidence une différence significative du taux de décharge moyen due à l’orientation des yeux est illustré dans la figure 3.17. Ce neurone

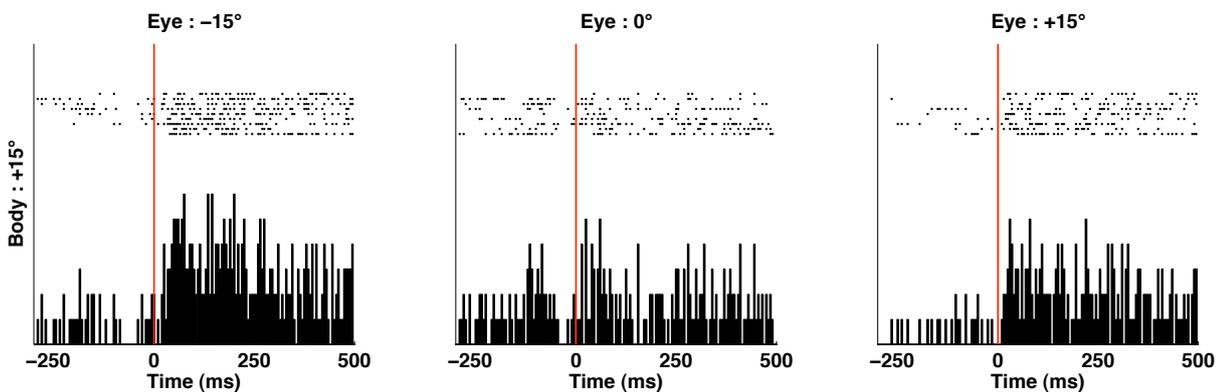


FIGURE 3.17 – Activité d’un neurone isolé dont l’AES est modulée significativement par l’orientation des yeux pour l’orientation du corps à 0° (Anova à un facteur, $p < 0.05$).

décharge de manière plus soutenue lorsque les yeux sont orientés vers la gauche (-15°) que lorsque l’axe des yeux est aligné avec celui de la tête (0°).

Un autre exemple qui illustre également des modulations du niveau d’AES dues à l’orientation des yeux (Friedman, $p < 0.05$) est présenté dans la figure 3.18. Une décharge neuronale plus soutenue lorsque les yeux sont orientés vers la droite ($+15^\circ$) quelque soit l’orientation du corps est visible sur le raster et PSTH de la figure 3.18.

c) Modulation de la latence :

Sur les 12 sites enregistrés avec un contrôle fiable, l’analyse générale n’a pas relevé d’effet significatif du à l’orientation des yeux sur les latences. Cependant, comme pour l’AES, l’analyse

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

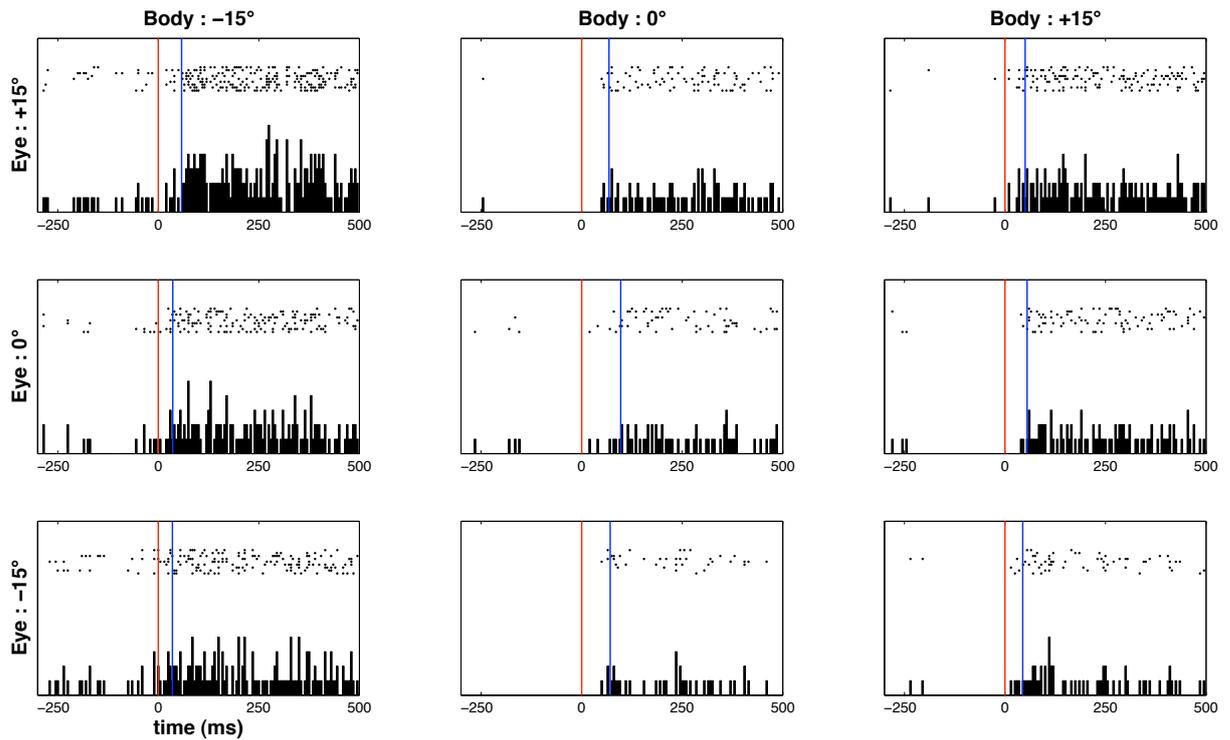


FIGURE 3.18 – Activité d'un site multi-unitaire dont l'AES est modulée significativement par l'orientation des yeux dans les trois premiers blocs enregistrés (Friedman, $p < 0.05$ pour chaque bloc).

intra-bloc permet de mettre en évidence que les latences d'1 neurone et de 4 sites multi-unitaires sont modulées par l'orientation des yeux dans une des orientations du corps testées (Friedman, $p < 0.05$).

Le premier exemple est illustré pour le bloc où le corps est aligné avec la tête (0°) dans la figure 3.19. Il est issu d'un enregistrement unitaire dont l'activité lorsque le corps n'est pas orienté par rapport à la tête (0°) présente une modulation significative de la latence due à l'orientation des yeux (voir fig. 3.19-A, 3.19-B et 3.19-C). La distribution des latences calculées pour ces trois orientations des yeux est représentée sous forme de boxplot dans la figure 3.19-D. La réponse de ce neurone au stimulus est significativement plus rapide d'au moins 16ms sur la médiane, lorsque les yeux, le corps et la tête sont alignés (boxplot vert sur la fig. 3.19-D) plutôt que les yeux orientés vers la droite ($+15^\circ$ - boxplot bleu) ou vers la gauche (-15° - boxplot rouge) (Friedman, $p < 0.05$). Les 4 autres sites, multi-unitaires, enregistrés montrent une modulation significative des latences due à l'orientation des yeux lorsque le corps est orienté vers la gauche ($n = 2$; Friedman, $p < 0.05$) ou vers la droite ($n = 2$; Friedman, $p < 0.05$).

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

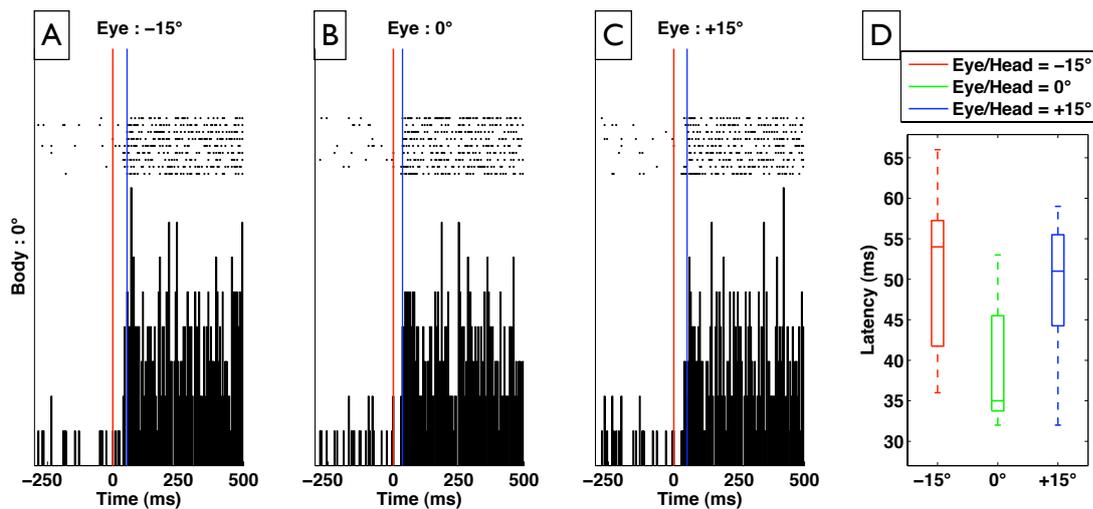


FIGURE 3.19 – Les figure A, B et C présente l’activité d’un neurone dont les latences sont modulées significativement par l’orientation des yeux pour l’orientation du corps à 0° (Friedman, $p < 0.05$). La figure D présente la distribution de ces latences (valeur médiane : 54ms à -15°, 35ms à 0° et 51ms à +15°).

3.4.1.3 Effet combiné de l’orientation des yeux et du corps

Parmi nos enregistrements, deux sites multi-unitaires présentent soit un effet d’interaction entre l’orientation des yeux/tête et l’orientation du corps/tête sur le niveau de l’AES uniquement soit deux modulations significatives, l’une de l’AS et l’autre de la latence, dues respectivement à l’orientation des yeux et à l’orientation du corps.

Le site multi-unitaire qui présente une interaction sur le niveau d’AES est présenté dans la figure 3.20. Cet enregistrement présente un contrôle fiable (Anova à deux facteurs, $p > 0.05$). L’interaction entre l’orientation des yeux et du corps sur le niveau d’AES peut être visualisée sur la représentation des moyennes et erreurs standard dans les figures 3.21-A et 3.21-B. A partir de ces deux figures, on peut faire deux remarques. 1 - La réponse augmente ou diminue de manière opposée en fonction de l’orientation des yeux pour les orientations du corps à 0° et +15° (voir fig. 3.21-A). 2 - Sur la figure 3.21-B, seul le niveau d’activité pour une orientation du corps à -15° semble constant quelque soit l’orientation des yeux..

Il est difficile de donner une interprétation sur cet effet d’interaction avec une représentation de l’activité en fonction de l’orientation de la tête ou même des yeux. Cependant l’étude de [Snyder et al. 1998] a mis en évidence que dans le cortex pariétal la modulation induite par la rotation du corps/tête ou de la tête/corps est similaire. En posant l’hypothèse que ce soit vrai dans V1, nous pouvons alors représenter nos données en fonction de l’orientation du regard (“Eye/Head” + “Head/Body”). Bien que lors de l’enregistrement, la tête fut maintenue fixe, nous transformons la représentation pour obtenir une organisation comme ci le corps avait été

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

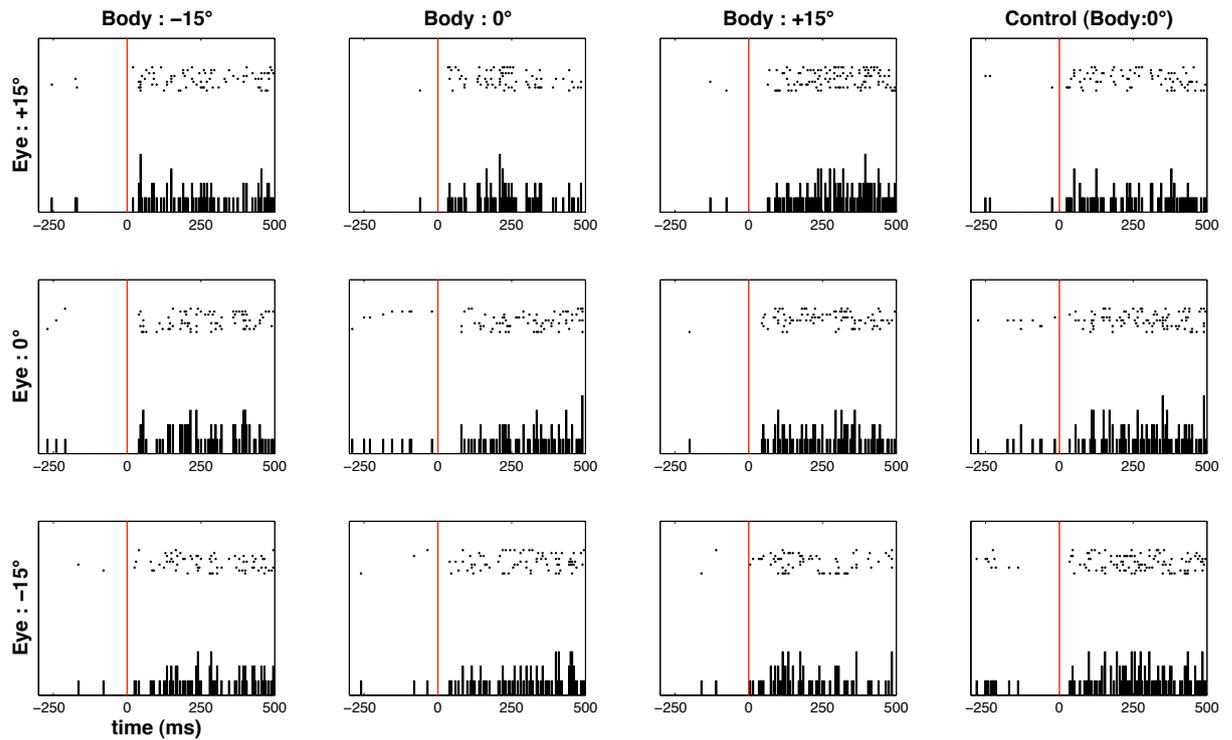


FIGURE 3.20 – Activité d'un site multi-unitaire dont l'AES est modulée significativement par l'interaction entre l'orientation des yeux et du corps (Anova à deux facteurs, $p < 0.05$).

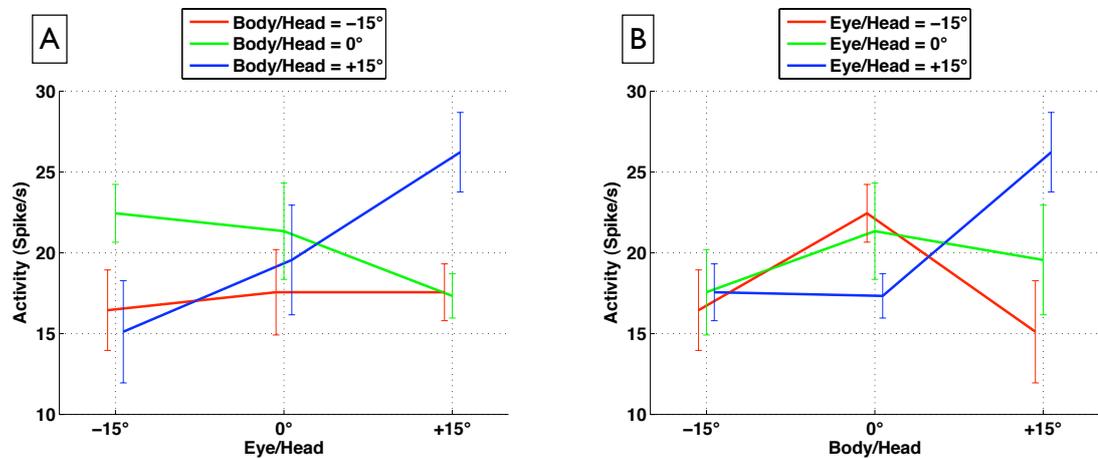


FIGURE 3.21 – Activité moyenne et erreur standard pour chaque condition de l'enregistrement du site multi-unitaire présenté 3.20. L'AES de ce site est modulée significativement par une interaction entre l'orientation du corps et des yeux (Anova à deux facteurs, $p < 0.05$). La figure A présente les différents niveaux d'activités moyens pour chaque condition en fonction de l'orientation des yeux. La figure B illustre la même activité moyenne mais en fonction de l'orientation du corps.

maintenu fixe. Pour bien comprendre cette transformation, nous l'avons illustrée dans la figure 3.22. Sur la gauche de cette figure, nous retrouvons une représentation condensée de notre pro-

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

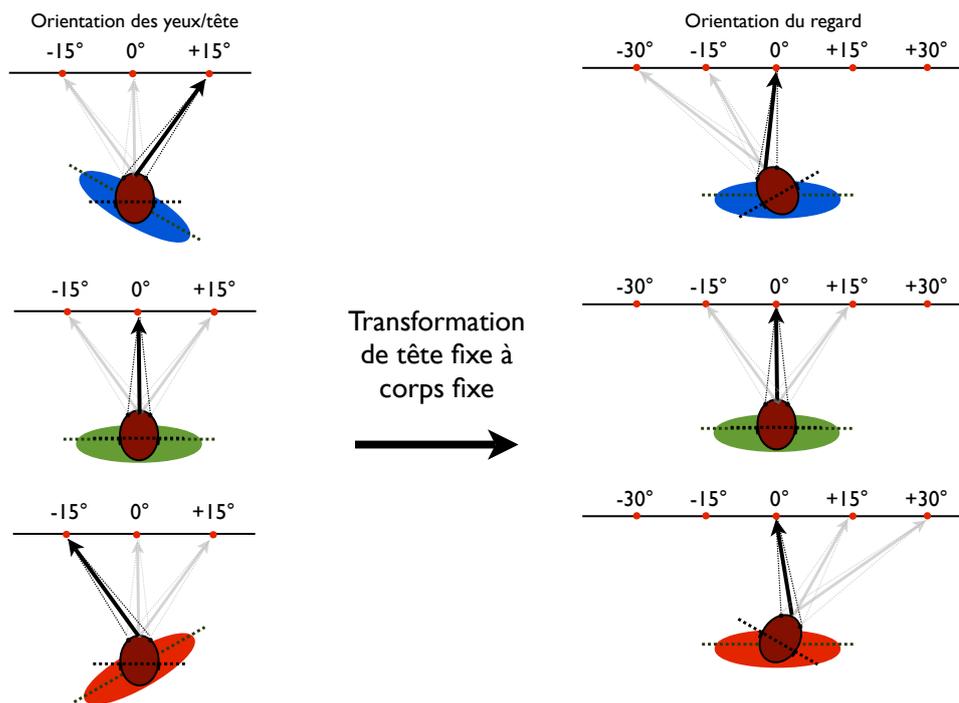


FIGURE 3.22 – Transformation de présentation de notre protocole où, on le rappelle, la tête est maintenue fixe/environnement. Les figures situées sur la gauche récapitulent notre protocole avec la tête fixe par rapport à l’environnement. Les figures situées sur la droite présentent les mêmes configurations posturales mais avec le corps maintenu fixe pour illustrer les différentes directions du regard (œil/tête + tête/corps) testées. Chaque ligne correspond à la même configuration du cou (corps/tête = - tête/corps). Les flèches noires correspondent, ligne par ligne, à la même configuration des muscles des yeux (ligne par ligne). Les six figures où la direction des yeux/tête est indiquée par une flèche noire représentent la même orientation du regard (0°).

L’orientation du corps vers la droite/tête, colorée en bleu, nous permet d’enregistrer des orientations du regard (œil/tête + tête/corps) à -30° , -15° et 0° . L’orientation du corps alignée avec la tête, colorée en vert, nous permet d’enregistrer des orientations du regard (œil/tête + tête/corps) à -15° , 0° et $+15^\circ$. Finalement, l’orientation du corps dirigée vers la gauche/tête, colorée en rouge, nous permet d’enregistrer des orientations du regard (œil/tête + tête/corps) de 0° , $+15^\circ$ et $+30^\circ$.

protocole avec les 9 conditions. Sur la droite de cette même figure, nous présentons les mêmes orientations des yeux/tête et de la tête/corps en considérant maintenant le corps fixe. On montre ainsi les différentes orientations du regard testées par notre protocole qui sont -30 , -15 , 0 , $+15$ et $+30^\circ$. Une remarque importante est que jusqu’à présent nous parlons de l’orientation du corps/tête alors qu’avec une représentation par rapport au corps nous parlons de l’orientation de la tête/corps. Il y a donc une inversion des signes (orientation du corps/tête = - orientation de la tête/corps). Basée sur cette transformation, la figure 3.23 illustre l’activité du site multi-unitaire, dont le raster est présenté dans la figure 3.20, en fonction de l’orientation du regard

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

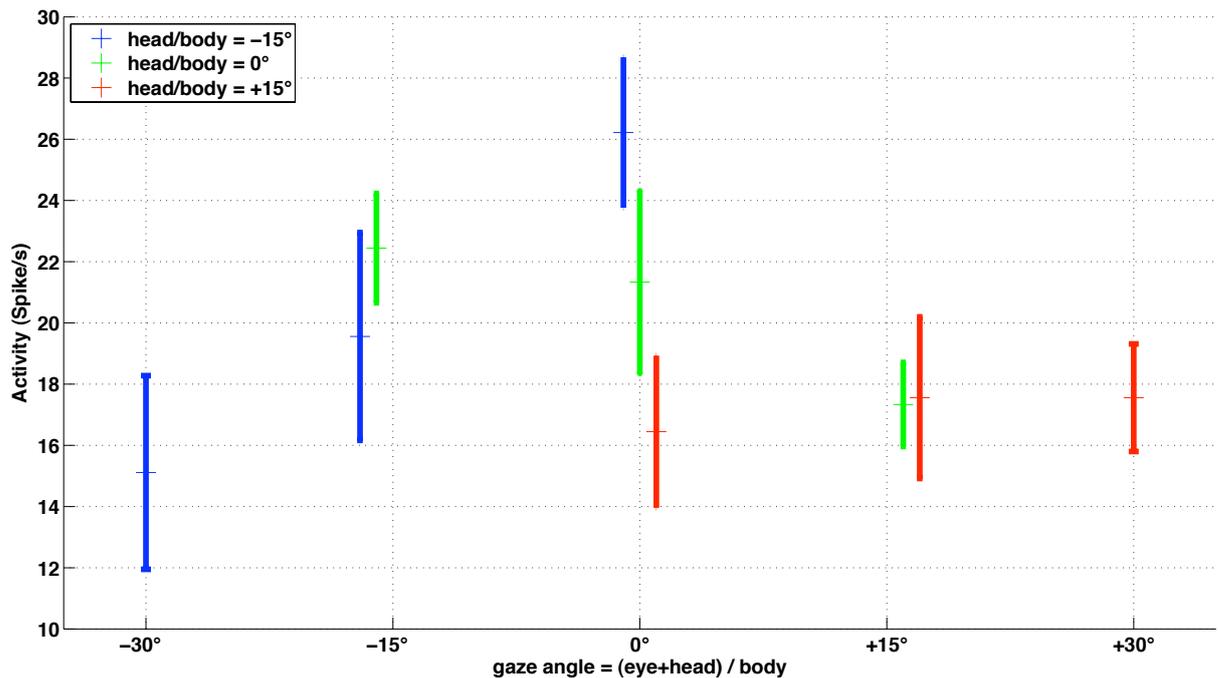


FIGURE 3.23 – Activité moyenne et erreur standard pour chaque condition corps de l’enregistrement en fonction de l’angle du regard pour le site multi-unitaire présenté dans les figures 3.20 et 3.21. L’AES de ce site est modulée significativement par une interaction entre l’orientation du corps/tête et des yeux/tête (Anova à deux facteurs, $p < 0.05$). Le code couleur bleu, vert et rouge permet de différencier lorsque l’orientation de la tête/corps est de -15° , 0° et $+15^\circ$, respectivement. Ce code couleur est identique aux figures précédentes (3.21-A et 3.22).

(œil+tête / corps). Nous avons conservé le même code couleur pour chaque configuration des muscles du cou que ce soit du corps/tête ou de la tête/corps. A partir de la figure 3.23, nous proposons une interprétation de l’activité de ce site comme étant un codage contralatéral à l’axe sagittal du corps.

On n’observe aucune modulation d’activité pour ce site lorsque le stimulus est présenté sur la droite du corps (orientation du regard à $+15^\circ$ et $+30^\circ$ sur la fig. 3.23). L’activité est même constante pour les 3 orientations des yeux lorsque la tête/corps est orientée à $+15^\circ$ (condition équivalente à l’orientation de -15° du corps/tête dans la figure 3.21-A et 3.21-B). A l’inverse, on observe clairement une variation de l’activité due à l’orientation des yeux lorsque la tête est orientée vers la gauche/corps (-15° - couleur bleue - fig. 3.23). La dernière orientation de la tête/corps (0° - couleur verte - fig. 3.23) renforce ces observations car l’activité est la plus forte lorsque le stimulus se situe dans la partie contralatérale au corps (-15° fig. 3.23) que pour l’orientation ipsilatérale au corps ($+15^\circ$ - fig. 3.23). Pour finir, la modulation que l’on peut observer lorsque le stimulus est présenté face au corps (0° - fig. 3.23) nous renseigne directement sur l’orientation de la tête/corps. L’activité est la plus forte lorsque la tête/corps est orientée vers la gauche (en bleu - fig. 3.23), un peu moins si la tête est alignée avec le corps (en vert - fig.

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

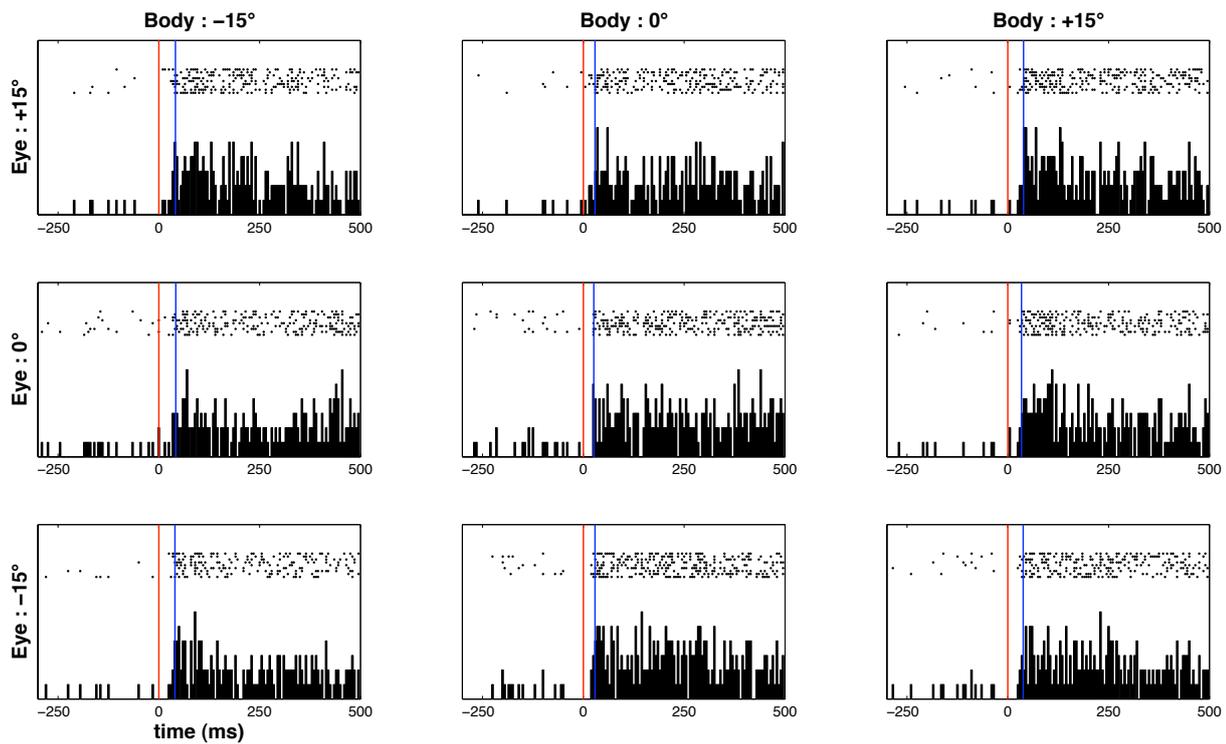


FIGURE 3.24 – Activité d'un site multi-unitaire dont l'AS est modulée significativement par l'orientation des yeux (Friedman, $p < 0.05$) et les latences sont modulées par l'orientation du corps (Friedman, $p < 0.05$).

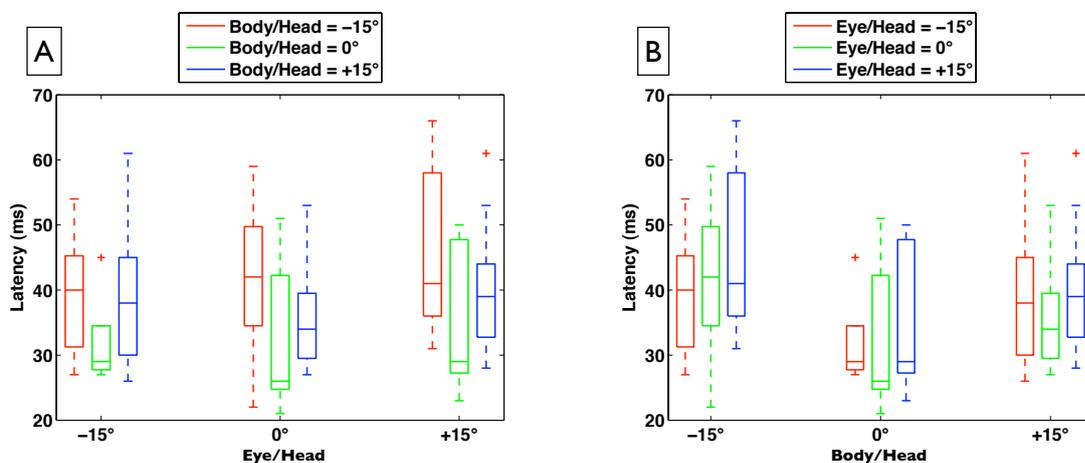


FIGURE 3.25 – Latences du site multi-unitaire (fig. 3.24) qui sont modulées significativement par l'orientation du corps (Friedman, $p < 0.05$).

3.23) et la plus basse lorsque la tête/corps est orientée vers la droite (en rouge - fig. 3.23). En conclusion, les signaux extrarétiniens ne modulent pas avec la même force l'activité neuronale. On aurait pu s'attendre à enregistrer le même niveau d'activité pour une même orientation du regard (par exemple à 0°). Or, pour ce site multi-unitaire, la configuration du cou joue un rôle dominant sur la configuration des yeux/tête et présente une préférence controlatérale à l'axe

du corps.

Le second site multi-unitaire montrant un effet combiné est illustré par son raster et PSTH dans la figure 3.24. Ce site présente deux effets significatifs sur deux paramètres différents. Un premier effet significatif de l'orientation des yeux est mis en évidence par une analyse du niveau d'AS (Friedman, $p < 0.05$). On notera que l'effet sur le niveau d'AS n'est pas identique dans toutes les conditions du corps/tête mais est clairement présent lorsque le corps est aligné avec la tête. Le second effet est une modulation significative de l'orientation du corps sur la latence (Friedman, $p < 0.05$). Ce dernier est illustré dans les figures 3.25-A et 3.25-B. On y observe clairement des latences plus courtes lorsque le corps est aligné avec la tête (0°). Les différences des latences entre le corps à 0° et le corps orienté à -15° ou $+15^\circ$ sont au minimum de 9, 8 et 10ms et au maximum de 11, 16 et 12ms pour l'orientation des yeux à -15° , 0° et $+15^\circ$, respectivement.

3.5 Discussion

En dépit d'un nombre restreint d'enregistrements électrophysiologiques, cette étude montre clairement que la configuration du cou module l'activité des neurones dans l'aire visuelle primaire.

3.5.1 Synthèse de nos résultats

Le but de notre étude était de démontrer que les signaux de configurations des orientations du cou et des yeux par rapport à la tête modulent l'activité neuronale de l'aire visuelle primaire du singe. Nous avons enregistré l'activité neuronale dans 12 conditions : 3 orientations horizontales des yeux/tête \times 4 orientations horizontales du corps/tête. La tête était maintenue fixe par rapport à l'environnement (écran). Dans notre étude, le stimulus visuel est identique (rectangle de points aléatoires dynamiques) pour différentes orientations des yeux/tête et du corps/tête. Parmi les 36 sites enregistrés dans toutes les conditions nous nous sommes intéressés à trois paramètres que sont le niveau d'activité spontanée (AS), le niveau d'activité évoquée plus spontanée (AES) et la latence des réponses. Les différentes modulations que nous mettons en évidence par nos enregistrements de manière qualitative dans l'aire visuelle primaire sont :

- La modulation de l'AS due à l'orientation des yeux/tête.
- La modulation de l'AES due à l'orientation des yeux/tête.
- La modulation de l'AES due à l'orientation du corps/tête.
- La modulation de l'AES due à l'orientation combinée des yeux/tête et du corps/tête.

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

- La modulation de la latence de la réponse évoquée due à l'orientation des yeux/tête.
- La modulation de la latence de la réponse évoquée due à l'orientation du corps/tête.

Pour finir, un site cumule deux modulations sur deux paramètres différents qui sont :

- une modulation de l'AS due à l'orientation des yeux/tête et une modulation de la latence due à l'orientation du corps/tête.

3.5.2 D'un point de vue protocolaire

Le protocole dans lequel nous avons recueilli les données n'est pas le protocole d'origine. Le but initial était de tourner la tête/corps en maintenant le corps fixe. Le système mécanique n'ayant pas résisté à la force de l'animal, nous avons alors mis en place un dispositif qui permet de conserver la tête fixe et de tourner le corps avec un maintien des épaules pour s'assurer que les muscles du cou soient réellement étirés. Le premier dispositif nous a permis d'enregistrer seulement 4 neurones en six mois d'expérimentation. Nous pensons que le principal inconvénient était le fait que l'animal se sentait libéré de ses mouvements de tête lorsque l'on retirait la butée articulaire pour changer l'orientation de sa tête. Dès lors, l'animal forçait sur le système ce qui nous faisait perdre les cellules isolées. Dans toutes les autres études où la position du corps/tête était étudiée, le dispositif de rotation était commandé électriquement [Snyder et al. 1998], [Klam et Graf 2006], [Nagy et Corneil 2010]. Au lieu d'opter pour une solution électromécanique qui apporterait des perturbations électromagnétiques supplémentaires à la chaîne de mesures, nous avons conçu puis mis en place un dispositif de rotation du corps indépendant du système de maintien de la tête. On notera que [Snyder et al. 1998] n'ont pas relevé de différences significatives dans les effets électrophysiologiques lorsqu'ils ont tourné la tête sur le corps ou tourné le corps sous la tête. Les angles d'orientation entre le corps et la tête ont pu aussi être augmentés de 10 à 15°. Si dans le premier dispositif, la taille de l'écran était un paramètre important dû à l'excentricité de la présentation du stimulus par rapport au corps de l'animal, ce n'était plus le cas avec la tête maintenue fixe par rapport à l'écran. Avec la tête maintenue fixe, on limite aussi les variations de distance du point de fixation par rapport aux yeux (2cm de plus en -15° et +15°). Les orientations testées dans les autres protocoles étaient de +16° et -16° dans [Brotchie et al. 1995], ±24°, ±12° et 0° dans [Snyder et al. 1998], ±45° chez l'homme dans [Brotchie et al. 2003] et finalement ±25°, ±12.5° et 0° dans [Nagy et Corneil 2010]. Il est évident que plus on peut tester de positions et plus on pourra comprendre et modéliser l'effet de l'orientation de la tête et des yeux sur l'activité neuronale. Cependant, il faut prendre en compte que les orientations des yeux/tête, de la tête/corps et du corps/environnement sont corrélées. La fixation d'une cible excentrée à plus de 20° entraîne des mouvements de la tête/corps bien que les yeux/tête puissent fixer des cibles jusqu'à 35° lorsque la tête est maintenue fixe. De même, le corps/environnement est sollicité significativement lorsque l'excentricité d'une cible à fixer est

supérieure à 40 ° bien que l'orientation de la tête/corps puisse atteindre les $\pm 70^\circ$ [McCluskey et Cullen 2007].

Le rendement de notre singe n'est pas très élevé puisqu'il faut compter un minimum de 15 minutes pour qu'il réalise toutes les conditions (9×12 conditions soit 108 essais avec 3 rotations lentes du corps). La fiabilité de l'activité neuronale isolée était difficile à maintenir expliquant ainsi le nombre limité de sites enregistrés (8/113 avec un bon contrôle de l'activité évoquée plus spontanée).

3.5.3 Paramètres de codage de l'information

Dans notre analyse, nous avons pu montrer que l'orientation du corps/tête et/ou des yeux/tête pouvaient moduler le niveau d'AS, d'AES et la latence de façon indépendante. Nous présentons chacun de ces paramètres avant de discuter de leurs interactions.

- **L'AES** : Le codage d'un attribut donné dans un stimulus est relié à son niveau d'activité [Barlow 1972]. Le nombre de potentiels d'action émis pendant la présentation du stimulus (taux de décharge en PA/s) est l'un des types de codage le plus simple et permet de s'affranchir de la dimension temporelle. Des caractéristiques du stimulus comme l'orientation, le contraste, le mouvement sont à l'origine de modulations de l'activité évoquée dans V1. En lien avec des signaux extra-rétiniens, il a été mis en évidence que l'activité évoquée par un stimulus visuel dans V1 peut être modulée par l'angle de vergence [Trotter et al. 1992], la direction des yeux/tête [Trotter et Celebrini 1999] et l'orientation de la tête/gravité [Sauvan et Peterhans 1999]. Ces modulations sous forme de gains font partie de calculs neuronaux qui interviendraient dans les transformations de coordonnées [Zipser et Andersen 1988].

- **L'AS** : L'activité spontanée correspond à une activité présente en dehors de toutes stimulations sensorielles et de toutes activités motrices. Elle a longtemps été considérée comme un bruit neuronal. Pourtant, l'activité spontanée est modulée par l'angle de vergence notamment à de courte distance où l'activité est la plus élevée [Trotter et al. 1992], [Trotter et al. 1996]. Elle l'est également, à un moindre degré, par la direction des yeux/tête dans l'aire V1 [Trotter et Celebrini 1999] et dans l'aire A1 (cortex auditif primaire) [Werner-Reiss et al. 2003]. Le rôle fonctionnel de l'AS n'est pas encore bien compris. Plus récemment il a été montré que sa fluctuation peut influencer la perception ou la cognition [Sadaghiani et al. 2010].

- **La latence** : La latence des réponses évoquées a été proposée comme un autre type de codage. Basée sur des critères neurophysiologiques, la latence a permis d'expliquer le lien avec les données comportementales comme par exemple les temps de réaction en relation avec

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

des phénomènes cognitifs [Oram 2005]. Par ailleurs le seul rang d'arrivée des premiers potentiels d'action suffirait à expliquer la rapidité du traitement de l'information visuelle et de ses contraintes dans des tâches de détections ou de catégorisations de scène naturelles complexes [Thorpe et al. 2001] [Guyonneau et al. 2004]. Le codage par latence a été montré à différents niveaux du cerveau avec des raccourcissements de ces temps de latence lors d'intégrations multisensorielles dans le colliculus supérieur mais pas nécessairement liés au niveau de décharge du neurone [Rowland et al. 2007] ou de VIP (Ventral IntraParietal) [Avillac et al. 2005] [Avillac et al. 2007]. Ce qui n'est pas le cas de la sensibilité au seul contraste d'un stimulus visuel qui évoque une latence de réponse d'autant plus courte que le niveau de décharge est élevé [Maunsell et Gibson 1992] [Oram 2010]. Cette absence de relation systématique entre latence et niveau d'activité que l'on a pu décrire dans notre étude lors des réponses interactives avec la position de la tête ou des yeux serait davantage la signature d'un rôle fonctionnel de cette latence qui pourrait se traduire au niveau comportemental par exemple par des temps de réactions plus courts en fonction de la congruence de ces signaux extra-rétiniens. On peut faire le rapprochement avec les interactions visuo-auditives congruentes lors d'une tâche saccadique qui raccourcissent les latences dans V1 (sans modifier le niveau d'activité), ainsi que les temps de réactions des saccades oculaires correspondantes [Wang et al. 2008]. De même les effets de l'attention sur la latence visuelle dans V4 sont sans aucune mesure comparables aux seuls effets du changement de contraste [Lee et al. 2007]. Il est clair que l'influence multimodale a des conséquences fonctionnelles spécifiques sur les caractéristiques temporelles de l'activité neuronale.

Notre étude suggère que chacun de ces paramètres peut être une source de codage des informations. Ils sont probablement complémentaires dans le codage neuronal. Un de nos enregistrements montre en effet une modulation de l'AS due à l'orientation des yeux et une modulation de la latence due à l'orientation du corps.

3.5.4 Origine des signaux extra-rétiniens

- L'origine des signaux de l'orientation des yeux par rapport à la tête fait encore débat. Il existe cependant une hypothèse plus vraisemblable que les autres d'après [Wurtz 2008]. Dans sa revue, l'auteur discute de l'origine des principaux signaux connus pour être à la base de la stabilité visuelle comme la position des yeux par rapport à la tête. Deux hypothèses sont avancées dans la littérature. La première est qu'il existe une copie efférente [Von Holst 1954] ou une décharge corollaire [Sperry 1950] de la commande des muscles. La seconde est qu'il existe un retour proprioceptif venant directement de capteurs à l'étirement des muscles des yeux [Sherrington 1918] ou de la représentation de la position des yeux dans l'aire 3a [Wang et al. 2007]. Cette seconde hypothèse ne semble pas être assez rapide ce qui laisse conclure [Wurtz 2008] qu'à court terme, la décharge corollaire serait l'hypothèse la plus vraisemblable bien que le re-

tour proprioceptif puisse jouer un rôle mais dans des laps de temps plus longs. Cette hypothèse est renforcée par les travaux de [Xu et al. 2011] qui ont étudié le temps nécessaire pour obtenir dans l'aire 3a une représentation fiable de l'orientation des yeux (60 ms après un mouvement des yeux). Les auteurs en concluent que l'activité neuronale présente dans l'aire 3a n'est probablement pas utilisée dans la stabilité visuelle ou la commande motrice.

- L'origine des signaux de l'orientation du cou fait également débat. Deux hypothèses sont avancées. La première est qu'à la vue du grand nombre de muscles que contient le cou, ce signal viendrait des propriocepteurs des muscles du cou [Biguer et al. 1988] et plus précisément de ceux les plus proches de la colonne vertébrale [Richmond et Abrahams 1975], [Richmond et al. 1999]. La seconde hypothèse serait la copie efférente ou la décharge corollaire de la commande de ces muscles [Snyder et al. 1998]. Pourtant cette dernière hypothèse a été mise en doute par les travaux de [Brothie et al. 1995] qui ont remarqué que le signal changeait lorsque l'expérimentateur tournait lui-même la tête de l'animal. Une étude IRMf chez l'homme a permis de détecter des aires contenant des informations issues des propriocepteurs des muscles du cou à partir de la vibration de ces derniers. Deux réseaux sont mis en évidence. Le premier fait intervenir les aires somesthésiques comme les aires 3a, 2, s2 et PIVC (Parieto-Insular Vestibular Cortex). Le second réseau se compose de différents foyers dans le sillon intrapariétal, les aires motrices et prémotrices ainsi que le champ oculaire frontal (FEF - Frontal Eye Field) [Fasold et al. 2008]. Des connexions anatomiques existent entre l'aire 3a et LIP [Lewis et Van Essen 2000]. Cependant, si l'on suppose que le temps nécessaire pour obtenir une représentation de l'orientation de la tête/corps est similaire à celui relevé pour la représentation de la position des yeux/tête (60 ms - [Xu et al. 2011]) alors l'origine des signaux portant l'information sur l'orientation du cou ne viendrait pas du cortex somesthésique. Chez le chat, des stimulations des muscles du cou modulent le niveau d'activité des neurones de l'aire 17 de Brodmann [Buisseret 1988]. L'origine des modulations observée dans notre étude pourrait être proprioceptive, ce qui reste néanmoins à prouver.

3.5.5 Intégration de nos résultats dans la littérature

De précédentes études électrophysiologiques ont établi l'implication de l'orientation des yeux et de la tête dans le traitement neuronal oculomoteur (LIP : [Brothie et al. 1995] et [Snyder et al. 1998], CS : [Nagy et Corneil 2010]). Chez l'homme, [Brothie et al. 2003] ont montré qu'une région présente les mêmes caractéristiques que l'aire LIP (définie chez le macaque) appelée également champ oculaire du cortex pariétal (Parietal Eye Field [Andersen et al. 1992]). Dernièrement, le champ oculaire frontal (FEF : Frontal Eye Field), impliqué dans les mouvements des yeux et de la tête, a présenté une modulation de l'activité pour différentes orientations de la tête [Fasold et al. 2008]. On sait également qu'une saccade trop importante provoque une

3. ETUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DANS V1

rotation du cou et même du corps dans l'environnement [Freedman et Sparks 1997] [McCluskey et Cullen 2007]. Il n'est donc pas étonnant que les aires oculomotrices soient modulées par l'orientation de la tête/corps comme [Freedman et al. 1996] ont pu le constater en stimulant le CS ou [Corneil et al. 2004] en observant que les muscles du cou sont très rapidement requis pour orienter le regard vers des cibles visuelles même si l'orientation du cou n'est pas obligatoirement nécessaire. La vibration des muscles du cou entraîne des illusions sur la position de cibles visuelles [Lackner et Levine 1979] et modifie également la perception d'un hémichamp [Biguer et al. 1988]. Si ces différentes orientations des yeux/tête, de la tête/corps et même du corps/environnement jouent un rôle important dans l'observation du monde qui nous entoure, alors il ne serait pas impossible que ces différents signaux interviennent pendant le traitement de nos différents sens pour construire une représentation de notre environnement.

La représentation de l'espace se construit dès le début des traitements sensoriels [Kayser et Logothetis 2007] et plus particulièrement dès l'aire V1 [Trotter et al. 2004]. Notre étude renforce ces idées et montre de manière qualitative, mais pour la première fois, que les orientations du corps/tête et peut être du corps/environnement sont intégrées au sein du traitement visuel de l'aire V1 chez le macaque rhésus. Une remarque importante par rapport à notre protocole est qu'on ne peut différencier si c'est uniquement l'orientation de la tête/corps qui intervient dans la modulation puisque la tête étant maintenue fixe/environnement. Chaque rotation du corps/tête introduit également une rotation du corps/environnement. Cette situation est similaire à l'étude de [Brotchie et al. 1995] dont les auteurs ne pouvaient pas dissocier entre le référentiel corps-centré ou environnement-centré puisque le corps était fixe par rapport à l'environnement. Il faudrait donc réaliser une étude similaire à [Snyder et al. 1998] qui a permis de dissocier ces deux référentiels en tournant la tête/corps plus la tête/environnement.

Un récapitulatif des signaux qui modulent l'aire V1 est présenté figure 3.26.

3.5.6 Perspectives

Renforcer le nombre d'enregistrements en conservant ce protocole semble être la première perspective. Il serait ensuite intéressant d'étendre les enregistrements dans la partie calcarine de V1 où les champs récepteurs sont excentrés par rapport au point de fixation et où l'orientation de la tête/corps serait alors plus à même d'être sollicitée. Chez le chat il est montré que les afférences proprioceptives du cou portent des informations non seulement sur la position mais également sur la vitesse de rotation de la tête/corps [Anastasopoulos et Mergner 1982]. Il serait alors intéressant d'enregistrer l'activité neuronale dans V1 lorsque le corps tourne à vitesse constante puis variable par rapport à la tête maintenue fixe.

Une autre perspective intéressante serait d'identifier si les modulations observées sont à l'origine de l'orientation du corps/tête ou du corps/environnement. La tête étant mainte-

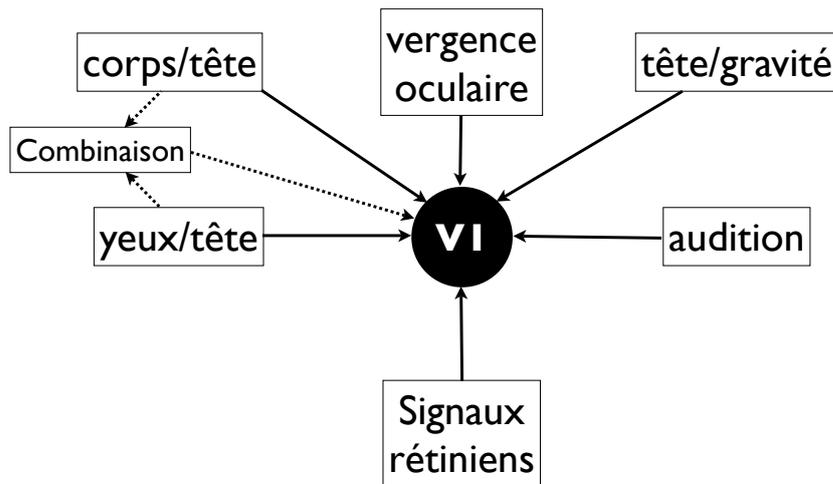


FIGURE 3.26 – Récapitulatif des signaux extra-rétiniens qui participent au traitement neuronal dans l'aire V1.

nue fixe par rapport à l'environnement, nous ne pouvons affirmer que la modulation neuronale mise en évidence dans nos enregistrements n'est pas liée en partie à l'orientation du corps/environnement. C'est en quelque sorte la situation identique à l'étude de [Brotchie et al. 1995] qui avait maintenue fixe le corps/environnement et que ce sont [Snyder et al. 1998] qui ont permis d'identifier que l'aire LIP n'était pas modulée par la position du corps/environnement contrairement à l'aire 7a. Il semble donc nécessaire d'identifier si des neurones de l'aire V1 peuvent être modulés par la position du corps/environnement ou uniquement de la tête/corps.

3.6 Conclusion

Cette étude électrophysiologique dans l'aire visuelle primaire nous permet d'affirmer que des signaux de position du corps par rapport à la tête modulent l'activité neuronale. Bien que le nombre de sites enregistrés soit faible, nous mettons en évidence qu'il existe une possible interaction avec les signaux de positions des yeux par rapport à la tête. On notera que ces modulations ont été observées au niveau de la latence et de l'activité évoquée plus spontanée (activité enregistrée pendant la présence du stimulus). Cette étude renforce clairement l'hypothèse de la présence ubiquitaire des signaux de positions des yeux/tête et de la tête/corps dans le système nerveux central.

4

Interprétation de l'effet de l'orientation du regard dans le cortex prémoteur dorsal

L'étude électrophysiologique présentée dans le chapitre précédent a été réalisée dans le but d'étudier les effets dus aux signaux de position de la tête/corps et de leur interaction avec les signaux de positions des yeux connus pour moduler l'activité des neurones de l'aire V1. Comme nous l'avions abordé dans le chapitre 2, ces signaux modulent également l'activité de neurones présents dans les aires motrices. Afin de mieux comprendre le rôle fonctionnel de ces paramètres, nous proposons dans ce chapitre une autre interprétation que leur implication dans les transformations de coordonnées. Pour cela nous proposons d'étudier les transformations nécessaires au contrôle de gestes d'atteinte visuellement guidés au sein du système nerveux central (SNC). Nous utilisons un modèle cinématique simplifié des articulations du haut du corps d'un mannequin. Le formalisme de l'asservissement visuel est utilisé pour synthétiser une loi de commande permettant de conduire la main à la cible tout en contrôlant la direction du regard. Dans un premier temps, nous regarderons le problème dans sa globalité en ne bloquant aucune articulation. Ensuite, nous nous placerons dans le cadre de l'étude électrophysiologique décrite dans [Jouffrais et al. 2000] où la tête est immobile.

Nous voulons montrer que les orientations des yeux/tête et de la tête/tronc sont des paramètres incontournables du contrôleur de la main, dès lors que le vecteur de différence main-cible est exprimé en coordonnées visuelles. Après avoir exprimé analytiquement le contrôleur, nous implémenterons un réseau de neurones artificiels (RDNa) de type perceptron. Ce dernier est

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

similaire à ceux proposés par plusieurs auteurs traitant de transformations de coordonnées en neurosciences [Blohm et al. 2009]. Ce RDNa a été entraîné pour exécuter des mouvements d'atteinte avec des directions de regard différentes. L'activité des neurones artificiels est analysée et comparée avec les résultats rapportés dans [Jouffrais et al. 2000]. A partir de cette étude, nous proposerons une nouvelle interprétation de la modulation de l'activité des neurones du cortex prémoteur dorsal liée à la direction du regard qui a été mise en évidence chez le singe durant des gestes d'atteinte avec des points de fixation imposés.

Le chapitre est organisé comme suit. L'étude électrophysiologique réalisée par [Jouffrais et al. 2000] est résumée dans la section 4.2. La section 4.3 présente le modèle cinématique et le schéma du contrôleur d'atteinte basé sur la vision. L'implémentation du contrôleur sur un RDNa et l'analyse de l'activité des cellules de la couche cachée sont présentées en section 4.4. Finalement, une conclusion sera donnée en section 4.5.

4.1 Quelles variables et quels référentiels sont utilisés par le SNC pour le contrôle d'un mouvement ?

Les résultats que nous avons présentés au chapitre précédent renforcent l'idée que l'intégration multisensorielle est un processus distribué qui débute dès les premières aires sensorielles. La convergence des traitements sensoriels vers le cortex pariétal est une certitude physiologique [Goodale et Milner 1992], [Johnson et al. 1996]. Elle suggère que la représentation multisensorielle de l'espace se finalise au sein du cortex pariétal. Cependant, l'observation de l'activité des neurones des aires pariétales montre que l'information traitée par ces cellules est codée dans des référentiels multiples : oculocentré, craniocentré, corps-centré ou même allocentrés. Ceci est en accord avec le modèle d'intégration proposé par [Pouget et al. 2002] qui est reproduit à la Fig. 2.4.

Cependant, il semble qu'une représentation unifiée de l'espace, par rapport à un même référentiel, permettrait de simplifier la planification et la commande d'une action [Soechting et Flanders 1989b], [Soechting et Flanders 1992], [Flanders et al. 1992], [Lacquaniti et Caminiti 1998], [Carrozzo et al. 1999] [Andersen et Buneo 2002], [Buneo et al. 2002], [Cohen et Andersen 2002], [Engel et al. 2002], [Buneo et Andersen 2006], [Schlicht et Schrater 2007]. Pour comprendre comment cette information multisensorielle est utilisée pour la commande d'un mouvement, il est donc nécessaire d'identifier quels types de variables et quelle(s) référence(s) spatiale(s) sont utilisées dans les aires motrices.

La plupart des travaux traitant de cette question en neurosciences répartissent ces variables en deux groupes. On distingue d'une part les paramètres intrinsèques qui décrivent l'état interne du corps et d'autre part les paramètres extrinsèques qui caractérisent la position et l'orientation

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

de la partie distale à contrôler. Par exemple, pour un mouvement d'atteinte de la main, les paramètres intrinsèques concernent principalement les variables articulaires (épaule, coude, poignet) permettant de décrire la configuration du bras, mais également les vitesses et accélérations des liaisons, ainsi que les forces et moments générés par les muscles. Bien qu'il n'existe pas réellement de capteur biologique permettant de mesurer directement l'angle des liaisons (comme sur les robots polyarticulés), l'information collective de variation de longueur des muscles permet d'identifier ces variables de manière unique. D'un autre côté, le codage extrinsèque de la main peut être réalisé par rapport à des référentiels divers : la configuration initiale de la main, l'épaule, la tête, l'œil, etc. Ce codage concerne la position et l'orientation de la main par rapport à ce repère mais peut également représenter sa vitesse, son accélération et les forces externes qui sont éventuellement appliquées. Pour contrôler un mouvement vers une cible présente dans le champ visuel, le SNC dispose des informations visuelles afin de localiser la cible et dans certains cas la main, mais également des mesures proprioceptives délivrées par les fuseaux neuromusculaires et les organes de Golgi, qui renseignent sur la configuration du membre. La question de savoir si le SNC utilise plutôt un codage extrinsèque de la position de la main, ou un codage intrinsèque de la configuration du bras, a été soulevée par de nombreux chercheurs. Les deux types de codage semblent étroitement liés et apparaissent dans différentes aires corticales. Des études expérimentales montrent que les cellules des aires S1 (Cortex Somesthésique primaire), M1 (Cortex Moteur primaire) et PPC (Cortex Pariétal Postérieur), dont on sait qu'elles sont impliquées dans le contrôle des mouvements volontaires, traitent vraisemblablement ces deux types de données [Helms-Tillery et al. 1996], [van Beers et al. 1998]. Les notions de coordonnées intrinsèques et extrinsèques sont voisines de celles de coordonnées « opérationnelles » et « articulaires » qui ont été introduites par les roboticiens dans les années 80 pour modéliser la cinématique et la dynamique des manipulateurs [Spong et Vidyasagar 1989], [Asada et Slotine 1986]. Ces modèles, qui ont été rappelés au chapitre 2, offrent une base idéale pour le calcul de lois de commande en boucle fermée. A ce titre, ils ont été considérés avec un grand intérêt par les modélisateurs en neurosciences. Classiquement, les schémas de contrôle des bras manipulateurs qui s'appuient sur ces modèles consistent à réguler l'erreur entre la configuration courante de l'effecteur dans l'espace opérationnel et une configuration cible. L'utilisation du modèle inverse permet de caractériser les variations articulaires, ou les couples, qui doivent être appliqués pour réaliser le mouvement désiré.

Un grand nombre d'auteurs proposent que le SNC utilise également des modèles internes, représentant la cinématique et la dynamique du système musculo-squelettique, pour contrôler le mouvement [Shadmehr et Wise 2005]. Il a été montré que le cortex pariétal postérieur et le cortex frontal, qui sont fortement interconnectés, jouent un rôle important dans l'estimation de la configuration du corps et de la position de la cible, et dans le calcul des transformations de coordonnées [Jones et Powel 1970] [Johnson et al. 1996]. Bien que le rôle exact des différentes aires frontales et pariétales soit encore mal identifié, il semble que les aires situées près du

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

sillon central sont principalement impliquées dans le calcul de la dynamique, alors que celles qui en sont plus éloignées contribuent plutôt au calcul de la cinématique [Shadmehr et Wise 2005]. D'autre part, de nombreuses études sur des mouvements d'atteinte et de pointage chez le primate humain et non humain montrent que la consigne utilisée pour planifier et exécuter le mouvement est l'écart entre la position courante de la main et la position cible [Rossetti et al. 1995], [Ghez et al. 1997], [Vindras et Viviani 1998], [Ulloa et Bullock 2003], [Beurze et al. 2006], [Chang et al. 2009], [Beurze et al. 2010], [Blangero et al. 2010]. Cette référence du mouvement, appelée "*vecteur de différence*", a été clairement définie par [Shadmehr et Wise 2005] dans leur ouvrage de synthèse dédié à la neurobiologie du geste de pointage et d'atteinte. Dans ce livre, les auteurs expliquent qu'il est nécessaire que la position de la main et de la cible soient codées par rapport à un même référentiel pour que le SNC puisse calculer ce vecteur de différence. Dans le cas d'une cible visuelle, on peut raisonnablement penser que les neurones du PPC, qui reçoivent les informations visuelles et proprioceptives, réalisent les transformations permettant d'estimer la position de la main et de la cible dans un même référentiel. Une question fondamentale se pose alors : "quel référentiel est utilisé par le cerveau pour coder ce vecteur de différence ?". Cette question a fait l'objet d'un débat controversé en neurosciences.

Un premier courant de réflexion a été de proposer que le SNC utilise un référentiel corps-centré pour coder ce vecteur de différence. Cette idée a été suggérée par des résultats expérimentaux qui montrent que l'activité de différentes aires corticales varie en fonction de la position de la main ou du pied par rapport au corps [Georgopoulos et al. 1986], [Crammond et Kalaska 1989], [Tillery et al. 1996]. Au niveau spinal, il a été montré chez le chat, que le taux de décharge des neurones transmettant l'information proprioceptive des membres varie de façon monotone en fonction de la position du pied par rapport au bassin [Bosco et al. 2000]. Chez le singe, il a été montré que, durant la période de planification d'un mouvement d'atteinte, les cellules nerveuses de M1 [Kalaska et al. 1983], PMd et 5d [Crammond et Kalaska 1989] réalisent un codage corps-centré de la direction du mouvement à venir. [Lacquaniti et al. 1995] montrent que différentes populations de neurones de l'aire 5d codent l'azimut, l'élévation et la distance par rapport à l'épaule. Cependant les résultats qui ont le plus influencé ce courant de pensée en faveur d'un codage corps-centré du vecteur de différence sont certainement ceux de [Georgopoulos et al. 1986]. L'expérience réalisée concerne l'enregistrement électrophysiologique de neurones du cortex moteur chez le singe durant des tâches de pointage vers des cibles excentrées. Ces travaux mettent en évidence que les neurones de M1 ont une activité plus élevée lorsque le mouvement est orienté vers certaines cibles, suggérant l'existence de "directions préférées". Bien que le codage réalisé par chaque cellule se soit révélé peu précis, les auteurs suggèrent que la direction du mouvement peut être représentée de manière plus précise par des populations de neurones. Notons que dans cette expérience, comme seul le bras de l'animal pouvait se mouvoir, ce codage directionnel semble se réaliser par rapport au corps immobile. L'hypothèse que le système moteur utilise une référence corps-centrée pour la

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

commande des mouvements est aussi portée par le fait que le tronc constitue la base mécanique des membres. La base de l'épaule apparaît comme le socle naturel du mouvement du bras, jouant le même rôle que la base d'un manipulateur en robotique. Les modèles de commande en robotique de manipulation et le rôle de référence spatiale joué par la base ont très certainement renforcé ce point de vue. Si l'on admet que le SNC utilise un référentiel corps-centré pour coder le vecteur de différence, il est nécessaire que la position de la cible, initialement codée en coordonnées rétinienne, soit transformée dans un référentiel lié au corps (tronc, épaule,...). Cette transformation, basée sur l'intégration de données proprioceptives (position de l'œil dans l'orbite et position de la tête par rapport au tronc), et de données visuelles (position de la cible sur la rétine), est vraisemblablement réalisée au sein du PPC. Elle pourrait reposer sur les mécanismes de « champs de gain », décrits par Zipser et Andersen [Zipser et Andersen 1988].

Cependant, de nombreux résultats expérimentaux récents sur la neurobiologie du geste d'atteinte ont conduit les chercheurs à remettre progressivement en question cette hypothèse d'un codage corps-centré du vecteur de différence. Ces résultats semblent en effet montrer que pour planifier et contrôler un mouvement vers une cible visuelle, le SNC utilise plutôt un codage du vecteur de différence défini en termes de coordonnées visuelles. Ce résultat suggère une interprétation différente de l'activité du PPC. Au lieu de considérer que les neurones de cette aire transforment la position de la cible visuelle d'un référentiel rétinien à un référentiel corps-centré, on peut penser qu'ils intègrent les informations proprioceptives et visuelles afin d'exprimer la position de la main dans un référentiel oculocentré ou, selon certains auteurs, centré sur le point de fixation [Shadmehr et Wise 2005]. Les champs de gains multiplicatifs, initialement décrits comme des processus neuronaux permettant de combiner la proprioception et la vision dans le PPC pour coder la position des cibles visuelles par rapport à la tête, peuvent également être interprétés comme un moyen de reconstruire l'information spatiale dans un référentiel visuel [Pouget et Sejnowski 1997], [Brochier et al. 1995]. Différents résultats en électrophysiologie [Batista et al. 1999], [Pesaran et al. 2006] et en imagerie [Medendorp et al. 2003] corroborent l'hypothèse d'un codage oculocentré du vecteur de différence. En analysant l'activité de neurones de LIP et PRR liée à l'exécution de saccades et de mouvements d'atteinte, Cohen et Andersen ont montré l'existence d'une référence spatiale oculocentrée commune pour la synthèse des plans moteurs [Cohen et Andersen 2002]. De plus, il a été mis en avant que cette référence oculocentrée n'est utilisée que pour le codage des informations visuelles, mais permet l'intégration de données multisensorielles telles que l'audition ou la proprioception [Pouget et al. 2002]. [Buneo et al. 2002] ont observé que lorsque la position de la main et de la cible restent constantes par rapport au point de fixation, l'activité des neurones de l'aire 5d varie très peu, semblant indiquer que le vecteur de différence main-cible est codé dans un référentiel centré sur le point de fixation. L'existence de neurones sensibles à une information de position de la main donnée par la vision a été mise en évidence chez le singe dans l'aire 5d [Battaglia-Mayer et al. 2000]. Ces neurones semblent répondre à la fois à l'information de position du

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

membre donnée par la proprioception et par la vision [Graziano et al. 2000]. En psychophysique, de nombreuses études basées sur l'observation d'erreurs de pointage ou d'atteinte, liées aux mouvement de l'œil, ont renforcé l'idée d'un codage oculocentré du vecteur de différence [Henriques et al. 1998], [Henriques et Crawford 2002], [Medendorp et Crawford 2002], [Poljac et Van Den Berg 2003], [Beurze et al. 2006], [Van Pelt et Medendorp 2007], [Sorrento et Henriques 2008], [Thompson et Henriques 2008], [Blangero et al. 2010].

Cependant, bien qu'il y ait de plus en plus d'éléments semblant montrer que le SNC construit le vecteur de différence entre la main et la cible visuelle dans un référentiel visuel, la plupart des modèles traitant du contrôle moteur considèrent que la référence du mouvement est centrée sur le corps. Ces modèles prennent en compte la cinématique ou la dynamique du bras sans considérer l'influence de la position des yeux/tête ni la position de la tête/tronc. Par exemple, la quasi-totalité des travaux de recherche visant à déterminer quel critère de coût est minimisé par le SNC durant un mouvement d'atteinte considèrent que la position de la cible par rapport au corps est connue [Flash et Hogan 1985], [Uno et al. 1989], [Hoff et Arbib 1993], [Harris et Wolpert 1998], [Guigon et al. 2007]. Beaucoup de modèles concernant les transformations de coordonnées admettent que la vision joue un rôle central pour l'intégration du plan moteur, mais considèrent à la fin que l'information doit être transférée dans un référentiel corps-centré pour la commande [Pouget et al. 2002], [Crawford et al. 2004], [Beurze et al. 2006], [Sorrento et Henriques 2008], [Blohm et al. 2009]. Le modèle computationnel de commande proposé par [Shadmehr et Wise 2005] illustre clairement ce point de vue, il est intéressant de le considérer dans le détail.

Ce modèle, représenté à la Fig. 4.1, vise à décrire les étapes successives du traitement lié au contrôle d'un mouvement d'atteinte, en considérant que le vecteur de différence est exprimé dans un référentiel centré sur le point de fixation. Les auteurs décrivent les transformations inhérentes à ce modèle en utilisant un formalisme issu de la robotique. Les grandeurs reconstruites sont surmontées du symbole $\hat{\cdot}$, comme c'est usuellement le cas pour les valeurs estimées en automatique. Au premier niveau, la position de la cible \hat{x}_t (t pour target) et la position de la main \hat{x}_{ee} (ee pour end-effector), sont toutes deux exprimées dans un système de coordonnées visuelles centrées sur le point de fixation. La position de la main \hat{x}_{ee} est reconstruite à partir du vecteur de mesures proprioceptives du bras $\hat{\theta}$, via le réseau 1 qui code la cinématique directe, et à partir de la vision lorsque la main se trouve dans le champ visuel. La position de la cible est calculée via le réseau 2, à partir de la vision et des autres informations sensorielles disponibles, telle que l'audition. Une fois que les positions de la main \hat{x}_{ee} et de la cible \hat{x}_t sont exprimées en coordonnées centrées sur le point de fixation, le réseau 3 calcule le vecteur de différence x_{dv} par rapport à ce même référentiel. Le réseau 4 est supposé utiliser un modèle interne de la cinématique du bras. Il reçoit en entrée le vecteur de différence x_{dv} ainsi que la configuration articulaire du bras $\hat{\theta}$ et calcule la variation élémentaire des articulations du bras $\Delta\hat{\theta}$ qui permet de déplacer la main vers la cible le long de x_{dv} . Enfin, à partir de $\Delta\hat{\theta}$ et de $\hat{\theta}$, le réseau 5, qui

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

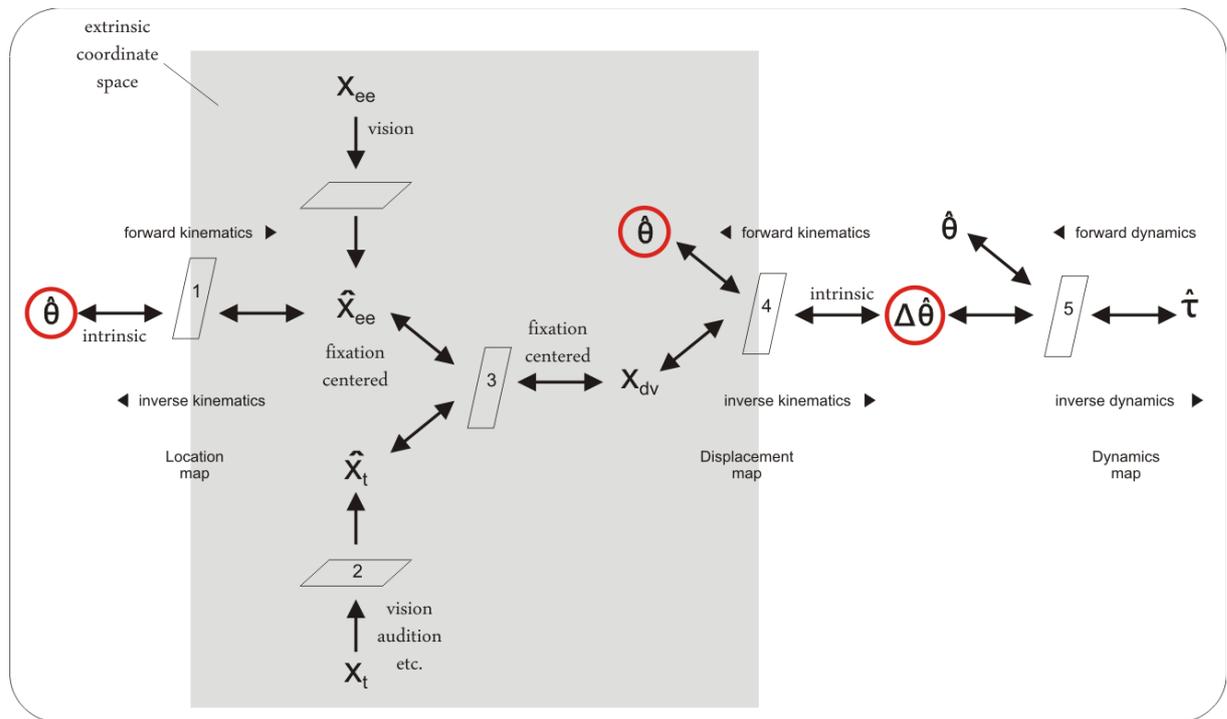


FIGURE 4.1 – D’après [Shadmehr et Wise 2005] p.246 : Modèle de robotique virtuelle donnant une vue schématique des étapes de calcul successives du traitement neuronal nécessaires au contrôle d’un mouvement d’atteinte

code un modèle interne de la dynamique du bras, calcule les couples $\hat{\tau}$ nécessaires à l’exécution du mouvement.

Il est très intéressant de noter que, bien que la référence du mouvement soit exprimée dans un référentiel lié à la direction du regard, l’orientation des yeux et de la tête ne sont pas évoquées dans ce modèle. En effet, les mesures proprioceptives considérées ne concernent que les articulations du bras $\hat{\theta}$ et leur variation $\Delta\hat{\theta}$ (cerclées en rouge sur la figure 4.1), alors que les transformations considérées concernent toute la chaîne cinématique reliant l’œil à la main.

Conscients qu’une variation de la direction de l’œil ou de la tête entraîne un déplacement du référentiel visuel centré sur le point de fixation, les auteurs arguent qu’un tel déplacement produit un même décalage de la position de la main et de la cible en termes de coordonnées visuelles. En conséquence, les auteurs en déduisent que la représentation du vecteur de différence reste identique par rapport au référentiel visuel. Ce raisonnement est cependant contestable puisque, s’il est vrai que les coordonnées d’un vecteur sont invariantes par translations, elle sont en revanche modifiées lors de rotations induites par des déplacements des yeux et/ou de la tête. Par suite, si l’expression du vecteur de différence est modifiée, il apparaît nécessaire que les aires motrices impliquées dans le calcul de la commande du geste d’atteinte prennent également en compte un modèle interne de la cinématique des liaisons de l’œil et du cou.

Cette dernière remarque est essentielle, nous y reviendrons plus en détail dans la section

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

4.3.2 de ce chapitre en développant un modèle de commande du bras à partir de techniques d'asservissement visuel, dans le but de montrer que les liaisons de la chaîne cinématique œil-tronc constituent des paramètres incontournables de la commande, dès lors que l'on considère une consigne du mouvement définie en termes de données visuelles.

Avant cela, nous allons décrire dans la section suivante des résultats d'études expérimentales en électrophysiologie qui semblent corroborer cette idée et peuvent difficilement être interprétés si l'on considère que les processus neuronaux codant la commande du bras reposent sur un référentiel corps-centré. L'objectif de ce chapitre sera de développer un modèle basé sur le formalisme de la robotique pour proposer une interprétation de cet effet de modulation qui a également été mis en évidence par d'autres auteurs [Mushiake et al. 1997], [Cisek et Kalaska 2002], [Batista et al. 2007].

4.2 Données électrophysiologiques

Dans cette partie, nous rappelons les résultats d'une étude électrophysiologique réalisée chez le singe par [Jouffrais et al. 2000], lors d'exécution de mouvements d'atteinte avec direction du regard imposée. Ces résultats mettent en évidence un effet de modulation de l'activité des neurones du cortex prémoteur lié à la direction du regard.

4.2.1 Tâche comportementale :

Deux macaques Rhésus ont été entraînés à réaliser des gestes d'atteinte visuellement guidés avec direction du regard imposé. Pour commencer un essai, le singe devait poser sa main au centre d'un écran placé face à lui. Cet écran était utilisé pour indiquer neuf positions, une centrale et huit périphériques (comme indiqué sur la fig. 4.2 B), en lesquelles apparaissaient les cibles à atteindre ainsi que des points de fixation. Lorsqu'un point rouge apparaissait en l'une de ces positions, l'animal devait y diriger son regard et le maintenir fixé, jusqu'à la fin de l'essai. Une cible blanche apparaissait ensuite en une de ces positions sur l'écran ; elle devenait grise après un court délai. Ce changement de couleur indiquait au singe qu'il devait réaliser un mouvement d'atteinte de sa main vers cette cible, tout en maintenant son regard fixé sur le point rouge (voir Fig. 4.2 A). Ainsi les singes étaient amenés à réaliser des mouvements vers une position tandis que leur regard fixait une autre direction (Fig. 4.2 B).

4.2.2 Résultats :

Les auteurs rapportent que 129 neurones de PMd montrent une direction préférée (DP) et/ou une modulation de leur activité en fonction de la direction du regard. La DP est définie comme la direction du mouvement pour laquelle l'activité du neurone est la plus forte. Pour la plupart

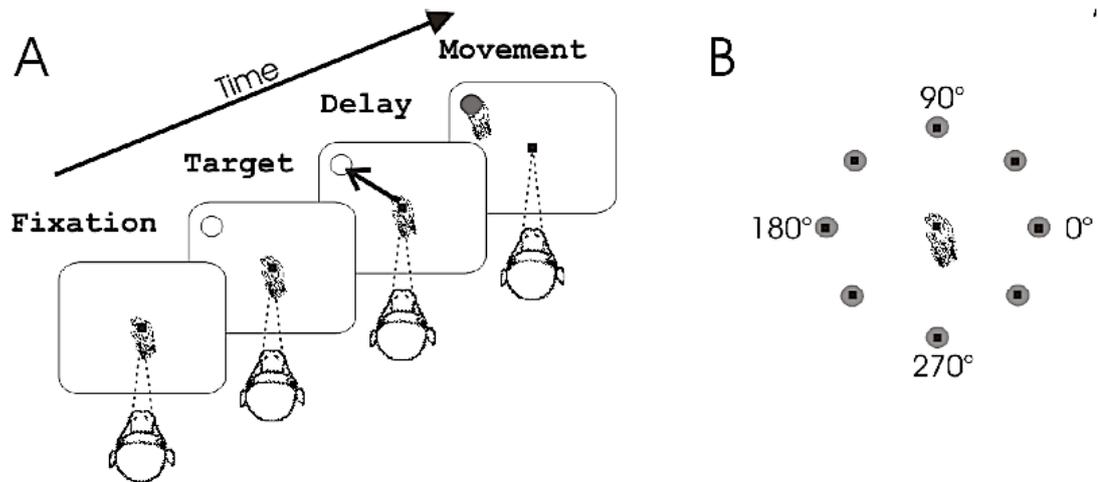


FIGURE 4.2 – Tâche comportementale : L'image (A) illustre le déroulement d'une tâche dans laquelle le singe fixe la cible centrale et atteint une des cibles périphériques. Les neuf positions des cibles à atteindre et/ou à fixer sont représentées sur l'image (B)

des cellules, la DP change en fonction de la direction de fixation du regard. Dans de nombreux cas, l'activité la plus forte a été obtenue lorsque les mouvements sont dirigés vers les cibles fixées. Pour moins de la moitié des cellules la DP reste stable, indépendamment de la direction du regard, mais son amplitude varie. Les figures 4.3 illustrent comment la position du regard module la DP : 7% des cellules (3 sur 41) montrent une amplitude modulée de la DP due à la position du regard et 60% des cellules (15 sur 25) montrent une rotation de la DP due à la direction du regard.

4.2.3 Conclusion

Cette étude, réalisée par [Jouffrais et al. 2000], aussi bien que des travaux précédents [Boussaoud 1995], [Mushiaké et al. 1997], [Boussaoud et al. 1998], [Boussaoud et Bremmer 1999], [Jouffrais et Boussaoud 1999], [Cisek et Kalaska 2002], [Batista et al. 2007], démontrent que la direction de codage des mouvements du bras dans PMd (et M1) est dépendante de la direction du regard. Cependant les modèles neurobiologiques existants ne permettent pas d'expliquer clairement les raisons de cette dépendance.

Ces résultats sont considérés comme marginaux par certains neuroscientifiques qui considèrent qu'un tel effet de modulation de l'activité des neurones de PMd par la direction du regard est incompatible avec le point de vue qu'ils partagent, que ces neurones codent le plan moteur dans un référentiel corps-centré. Par exemple, pour [Shadmehr et Wise 2005] (p.261), cet effet de modulation peut être l'expression neuronale du fait connu que la précision des mouvements dépend de l'angle entre le point de fixation et la position de la cible [Bock 1986]. Le raisonnement que nous développons dans ce chapitre vise à proposer un modèle computationnel plus solide pour interpréter ce phénomène en mettant en évidence que la direction du regard (directe-

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

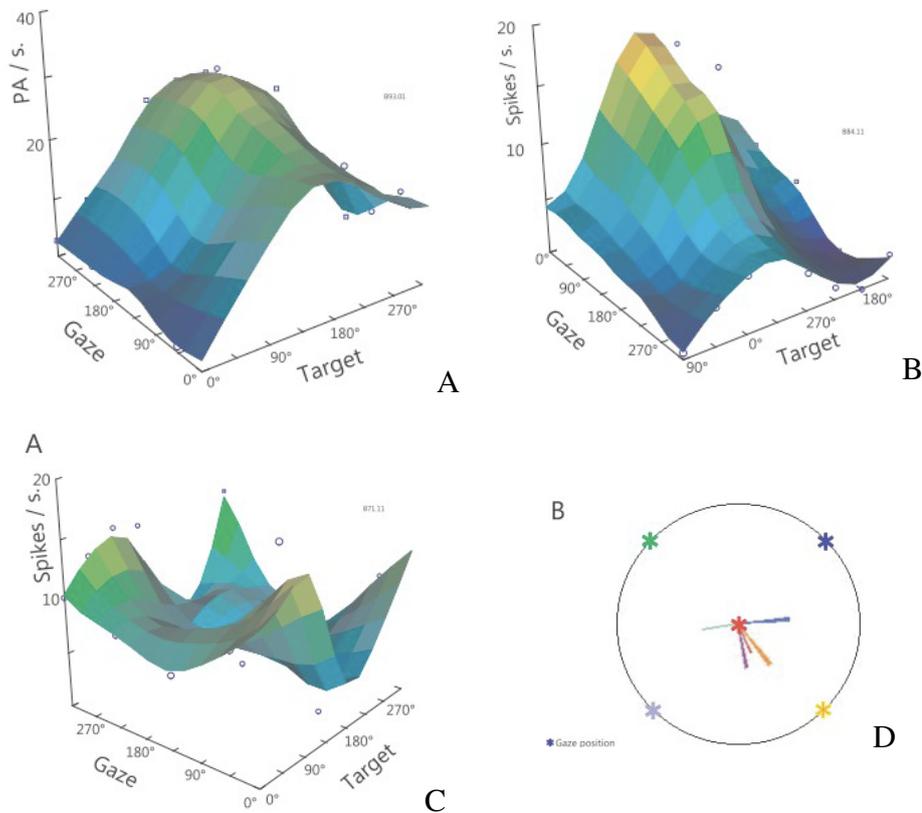


FIGURE 4.3 – Exemple type de réponse des neurones de PMd lors de gestes d’atteintes avec direction du regard imposée : A : Activité indépendante de la direction du regard, B : Activité dépendante de la direction du regard (la direction préférée (DP) n’est pas modifiée mais l’activité est modulée en fonction de la direction du regard), C : Activité dépendante de la direction du regard (la DP est modifiée par la direction du regard), D : Illustration de la variation la DP du neurone présenté en C en fonction de la direction du regard (le point de fixation est indiqué par une étoile (*) et la DP est indiquée par un segment de même couleur)

ment liée à la position de l’œil et de la tête) est un paramètre intrinsèque de la loi de commande du bras, dès lors que le vecteur de différence est exprimé en termes de coordonnées visuelles.

Dans la section suivante nous introduisons les fondements de l’asservissement visuel en robotique, qui est une approche permettant de synthétiser des lois de commande en boucle fermée sur les données visuelles. En utilisant ce formalisme nous donnerons ensuite l’expression d’une loi de commande permettant de réaliser un mouvement d’atteinte vers une cible visuelle tout en contrôlant la direction du regard.

4.3 Synthèse d’une loi de commande référencée vision

Dans cette section nous proposons d’utiliser le formalisme de l’asservissement visuel pour commander un modèle cinématique anthropomorphe afin d’exécuter un mouvement d’atteinte

vers une cible visuelle tout en contrôlant la direction du regard. Dans cette démarche, notre objectif n'est pas de proposer un modèle de commande qui soit biologiquement plus plausible que les modèles existants, mais plutôt de mettre en évidence les transformations cinématiques inhérentes à la synthèse d'une telle loi. Sur cette base nous voulons développer des arguments computationnels pour contribuer à interpréter les résultats décrits dans la section précédente.

4.3.1 L'asservissement visuel

Nous rappelons ici rapidement les fondements de l'asservissement visuel en nous appuyant sur la présentation proposée dans [Chaumette et Hutchinson 2006] et [Chaumette et Hutchinson 2007]. L'idée de base de l'asservissement visuel est de commander le mouvement d'un robot en régulant une fonction de sortie e , appelée "fonction de tâche", définie comme la différence entre la valeur courante d'un vecteur de k paramètres visuels, $s \in \mathbb{R}^k$ et une valeur de référence $s^* \in \mathbb{R}^k$:

$$e = s - s^*$$

Le vecteur de données s peut être déduit des coordonnées de motifs 2D dans le plan image de la caméra [Espiau et al. 1992], de la reconstruction 3D de la situation de la caméra [Thuilot et al. 2002], ou d'une combinaison des deux [Malis et al. 1999]. La matrice d'interaction L_s , associée au vecteur s , permet d'exprimer le lien différentiel entre la variation instantanée de la fonction de tâche et le torseur cinématique¹ v_c

$$\dot{e} = L_s v_c \tag{4.1}$$

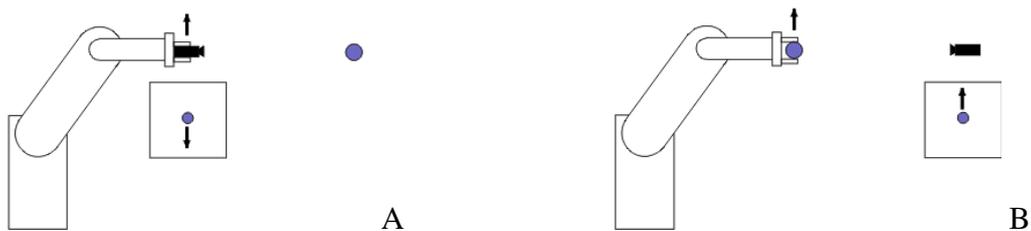


FIGURE 4.4 – D'après [Chaumette et Hutchinson 2007], illustration de deux configurations duales pour l'asservissement visuel. Sur la figure A, la caméra est embarquée et la cible est fixe ("eye-in-hand"), alors que sur la figure B la caméra est déportée ("eye-to-hand") et la cible est embarquée. Dans les deux cas, on a représenté le mouvement apparent du point cible projeté dans le plan image de la caméra. Son sens de déplacement est identique à celui du robot dans le cas où la caméra est déportée et il lui est opposé dans le cas où la caméra est embarquée.

1. Le torseur cinématique $v_c = (v_c, \omega_c)^T$ décrit le torseur des vitesses de la caméra par rapport à la scène ; v_c représentant sa vitesse de translation et ω_c sa vitesse de rotation.

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

Nous considérons le problème de commander un robot manipulateur, constitué d'une chaîne cinématique simple, à l'aide des données visuelles délivrées par une caméra. On notera R_b le référentiel fixe lié à la base du robot et R_c le référentiel lié à la caméra. Deux situations sont à considérer comme l'illustre la figure 4.4. Soit la caméra est attachée à l'effecteur du robot, définissant un système de type "eye-in-hand", soit elle est déportée et constitue un système de type "eye-to-hand". Dans les deux cas, l'équation décrivant la cinématique de la tâche a la même forme :

$$\dot{e} = J_e \dot{q} + \frac{\partial e}{\partial t}, \quad (4.2)$$

où, $q \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur des variables articulaires du robot, $J_e \in \mathbb{R}^{k \times n}$ est la matrice jacobienne de la tâche et $\frac{\partial e}{\partial t} \in \mathbb{R}^k$ exprime les variations des paramètres visuels qui sont indépendantes des variations articulaires.

- Pour un système avec caméra embarquée (eye-in-hand) l'expression de J_e est :

$$\begin{aligned} J_e &= L_s {}^c V_n {}^n J(q), \\ &= L_s {}^c V_b {}^b J(q), \end{aligned} \quad (4.3)$$

où ${}^c V_n$ est la matrice de transformation entre le référentiel de la caméra R_c et le référentiel de l'organe terminal R_n et ${}^n J(q)$ est la jacobienne du robot exprimée dans R_n . Si la caméra est rigidement fixée à l'organe terminal, ${}^c V_n$ est constant. Dans le cas d'une caméra embarquée, $\frac{\partial e}{\partial t}$ représente la variation temporelle de s due au propre mouvement de la cible.

- Pour un système avec caméra déportée (eye-to-hand), l'expression de J_e est :

$$\begin{aligned} J_e &= -L_s {}^c V_n {}^n J(q), \\ &= -L_s {}^c V_b {}^b J(q), \end{aligned} \quad (4.4)$$

où, dans la première ligne de (4.4), la jacobienne du robot ${}^n J(q)$ est exprimée dans R_n et ${}^c V_n$ est la transformation de R_c à R_n qui varie continuellement durant l'asservissement. Alors que, dans la deuxième ligne de (4.4), ${}^b J(q)$ est exprimée par rapport à la base du robot R_b et la transformation ${}^c V_b$ de R_c à R_b est constante si la caméra reste immobile. Ici $\frac{\partial e}{\partial t}$ représente la variation de s induite par un mouvement propre de la caméra.

Dans les deux cas, en résolvant en \dot{q} l'équation commune (4.2), on peut trouver un contrôleur cinématique permettant d'exécuter la tâche. Cependant, la résolution de ce problème d'inversion n'est pas simple car la dimension de la tâche k est généralement inférieure à la dimension n de la chaîne cinématique. Il s'ensuit que la matrice J_e n'est pas carrée, traduisant le fait que le système est redondant par rapport à la tâche. En conséquence, il existe généralement une infinité de solutions dans l'espace articulaire permettant de réaliser une trajectoire donnée dans l'espace

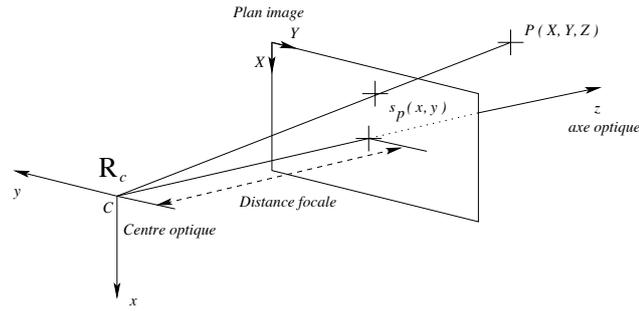


FIGURE 4.5 – Modèle sténopé d'une caméra

de la tâche. Une façon pratique de résoudre le problème consiste à utiliser la pseudo-inverse de Moore-Penrose $J_e^+ = J_e^T (J_e J_e^T)^{-1}$ de la matrice J_e . Elle permet de trouver une expression particulière du contrôleur correspondant à la solution de norme euclidienne minimale :

$$\dot{q} = J_e^+ \left(\dot{e} - \frac{\partial e}{\partial t} \right) \quad (4.5)$$

Dans la suite, comme les tâches d'asservissement visuel que nous souhaitons exécuter concernent la fixation ou l'atteinte de cibles ponctuelles, nous ne considérerons que des motifs visuels définis par les coordonnées 2D, $s_p = (x, y)^T$, de la projection de points 3D, $P = (X, Y, Z)^T$, dans le plan image de la caméra. En utilisant le modèle sténopé de la caméra (voir Fig. 4.5), avec une distance focale est égale à 1, les relations de projection sont données par :

$$\begin{cases} x = X/Z \\ y = Y/Z \end{cases}$$

Classiquement, de la dérivation de ces relations on peut extraire l'expression du torseur d'interaction L_s associé au point [Espiau et al. 1992] :

$$L_s = \begin{bmatrix} -\frac{1}{Z} & 0 & \frac{x}{Z} & xy & -(1+x^2) & y \\ 0 & -\frac{1}{Z} & \frac{y}{Z} & 1+y^2 & -xy & -x \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

En introduisant cette expression dans l'équation (4.1), on obtient l'équation du flux optique.

4.3.2 Le modèle cinématique anthropomorphe

Dans cette section nous allons décrire le modèle cinématique simplifié que nous avons considéré pour simuler des mouvements d'atteinte visuellement guidés en utilisant la commande référencée-vision. Ce modèle décrit la structure cinématique de la partie supérieure d'un sujet assis. Notre objectif est de mettre en évidence qu'une loi de commande référencée-vision du mouvement d'atteinte vers une cible visuelle dépend des liaisons du bras, mais aussi

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

nécessairement des liaisons de la chaîne œil-tronc. Pour cela, il n'est pas nécessaire de prendre en compte un modèle anthropomorphe détaillé et complet. L'essentiel est que ce modèle capture la structure arborescente définie par la chaîne du tronc qui supporte à la fois la chaîne du bras exécutant le mouvement et la chaîne de la tête constituée par les liaisons du cou et de l'œil. Le modèle que nous avons considéré est représenté à la Fig. 4.6.

En neurosciences, dans la littérature dédiée aux mouvements de pointage et d'atteinte, le référentiel oculocentré (eye-centered frame) est usuellement attaché à l'œil dominant [Khotva et al. 2005], [Blohm et al. 2009], [Shadmehr et Wise 2005]. Nous utiliserons ici la même convention en considérant un robot cyclope muni d'une seule caméra (la stéréo-vision ne jouant pas un rôle essentiel pour le sujet que nous traitons). La structure cinématique que nous considérons possède 15 ddl en rotation. La chaîne du tronc notée q_t possède 4 ddl et contient les articulations du bassin (2 ddl) et du torse (2 ddl). La chaîne de la tête notée q_o possède également 4 ddl et se compose des articulations du cou (2 ddl) et de l'œil (2 ddl). Enfin, la chaîne du bras notée q_a possède 7ddl. Elle réunit les articulations de l'épaule (3 ddl), du coude (2 ddl) et du poignet (2 ddl).

Dans un premier temps nous allons décrire la démarche générale permettant de synthétiser une loi de commande référencée-vision pour exécuter un mouvement d'atteinte tout en contrôlant la direction du regard, en utilisant tous les degrés de liberté de ce modèle. Nous contraindrons ensuite notre modèle en supposant le tronc fixe, de sorte à nous placer dans une situation comparable à celle du protocole de l'expérience de [Jouffrais et al. 2000] que nous avons rappelé à la section 4.2.

4.3.3 Expression des tâches

A partir du modèle que nous venons de décrire nous voulons exécuter deux tâches. La première tâche consiste à contrôler le mouvement de la caméra pour fixer un point de consigne. En d'autres termes, cela revient à déplacer la caméra pour que le point à fixer apparaisse au centre de l'image. Pour cela, on note F la position courante dans l'image du point à fixer et F^* la position désirée. La fonction de tâche est donnée par la relation :

$$e_1 = s_F - s_{F^*}$$

Pour réaliser cette tâche il est possible d'utiliser les ddl de la chaîne de l'œil q_o ainsi que ceux du tronc q_t . Pour simplifier la présentation, nous noterons q_1 la chaîne définie par la concaténation de q_t et de q_o , reliant le référentiel du bassin R_b au référentiel de la caméra R_c . Le système constitué par la chaîne q_1 portant la caméra est de type eye-in-hand. Dans ce cas, en accord

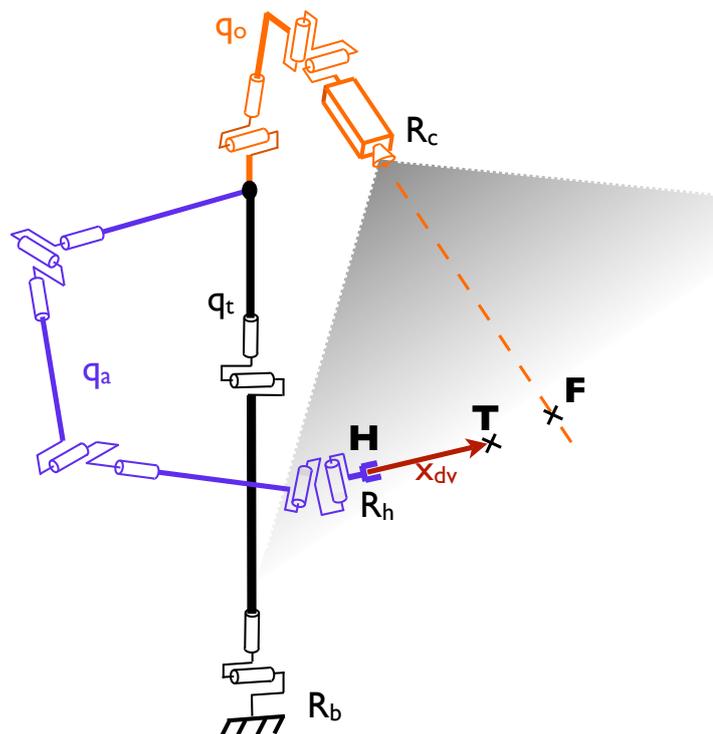


FIGURE 4.6 – Représentation du modèle cinématique simplifié de la partie haute du corps incluant le tronc, un bras, et la tête. Les articulations du tronc en noir sont notées q_t (bassin et torse), celles du bras en violet sont notées q_a (épaule, coude et poignet), et celles de la tête en orange sont notées q_o (cou et œil). On distingue les référentiels R_c , R_h et R_b respectivement liés à la caméra, à la main et au bassin. Ce dernier est considéré ici comme une base fixe par rapport à l'environnement. Le vecteur de différence entre la position de la main H et la position de la cible (main désirée) T est noté x_{dv} . Le point de fixation courant est noté F .

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

avec (4.2), la cinématique de la première tâche s'exprime :

$$\dot{e}_1 = J_{e_1} \dot{q}_1 + \frac{\partial e_1}{\partial t}, \quad (4.7)$$

où, $J_{e_1} = L_{s_F} {}^cV_b {}^bJ(q_1)$ d'après (4.3), L_{s_F} est la matrice d'interaction associée au point F , cV_b est la transformation entre R_b et R_c , ${}^bJ(q_1)$ est la matrice jacobienne associée à q_1 exprimée dans R_b et $\frac{\partial e_1}{\partial t}$ représente la variation de la tâche e_1 indépendante de la variation de q_1 . Ce dernier terme est nul lorsque la position du point à fixer reste constante.

La seconde tâche consiste à réaliser le mouvement d'atteinte de la main en déplaçant le point H jusqu'à la position cible T . La fonction de tâche est donnée par la relation :

$$e_2 = s_H - s_T$$

Pour réaliser cette tâche, il est possible d'utiliser les degrés de liberté du bras et du tronc. Nous noterons q_2 la chaîne cinématique définie par la concaténation de q_t et de q_a , reliant le référentiel du bassin R_b au référentiel de la main R_h . Dans ce cas, le système consistant à contrôler le mouvement de l'effecteur en actionnant la chaîne q_2 , à partir des données visuelles délivrées par la caméra déportée, est de type eye-to-hand. La cinématique de la seconde tâche s'exprime donc :

$$\dot{e}_2 = J_{e_2} \dot{q}_2 + \frac{\partial e_2}{\partial t}, \quad (4.8)$$

où, $J_{e_2} = -L_{s_H} {}^cV_b {}^bJ(q_2)$ d'après (4.4), L_{s_H} est la matrice d'interaction associée au point H , cV_b est la transformation entre R_b et R_c , ${}^bJ(q_2)$ est la matrice jacobienne associée à q_2 exprimée dans R_b et $\frac{\partial e_2}{\partial t}$ représente la variation de la tâche e_2 indépendante de la variation de q_2 . Ce dernier terme peut être lié à un déplacement du point cible T , mais également à un mouvement propre de la caméra lié à la tâche de fixation e_1 .

Telles que nous les avons définies, ces deux tâches ne sont pas découplées puisque les liaisons du torse sont communes aux chaînes q_1 et q_2 et peuvent être utilisées pour la fixation ou pour l'atteinte. La variation d'une de ces deux tâches peut donc entraîner une variation de l'autre. Dans ce cas, une façon de résoudre le problème en robotique consiste à définir des priorités de sorte à assurer la réalisation d'une tâche, dite principale, et utiliser au mieux la redondance du système sur les degrés de liberté communs pour réaliser au mieux l'autre tâche, dite secondaire. Dans la section suivante, nous allons utiliser cette approche pour contrôler le mouvement d'atteinte tout en maintenant la caméra dirigée vers le point de consigne de fixation.

Pondérations	
Bassin	52,2
Torse	38,0
Epaule	4,0
Coude	1,9
Poignet	0,5
Tête	5,2
Camera	0,1

TABLE 4.1 – Table de pondération des articulations par les masses

4.3.4 Pondération et gestion de la redondance

Dans la section précédente nous avons évoqué la notion de redondance du système par rapport à la tâche. Pour inverser l'équation (4.2), afin de la résoudre en \dot{q} , nous avons présenté la solution (4.5) qui consiste à utiliser la pseudo-inverse de la matrice jacobienne J_e . Comme nous l'avons rappelé, cette approche revient à choisir la solution \dot{q} de norme euclidienne minimale. Dans ce cas, les différentes variables articulaires sont sollicitées de manière équivalente pour réaliser la tâche.

Il est cependant possible de modifier ce critère afin de solliciter différemment les différentes articulations, sans toutefois modifier la trajectoire de la main dans l'espace opérationnel. Pour cela, nous utilisons la notion de pseudo-inverse W -pondérée définie par :

$$J_e^{W+} = W J_e^t (J_e W J_e^t)^{-1}, \quad (4.9)$$

où, $W = \text{diag}\{W_1, W_2, \dots, W_n\} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ est une matrice diagonale de pondération.

L'expression du contrôleur définie par :

$$\dot{q} = J_e^{W+} \dot{x} \quad (4.10)$$

donne alors la solution de norme W -pondérée minimale².

En choisissant la matrice W de sorte que le poids W_i associé à chaque articulation q_i corresponde à la masse corporelle déplacée, il est possible de faciliter le déplacement des segments les plus légers au détriment des plus lourds. On peut ainsi produire des mouvements ressemblant davantage au mouvement humain. Dans notre étude, nous avons choisi des coefficients fixes de pondération de la matrice W en nous basant sur les résultats de l'étude anthropométrique décrite dans [Armstrong 1988], qui indique une moyenne des mesures de masse corporelle de militaires américains (voir Tab. 4.1).

Outre la méthode de pondération de la jacobienne que nous venons de rappeler, il est

2. La norme W -pondérée est définie par $\|x\| = x^T W x$

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

également possible, lors de la résolution de l'équation (4.2), d'utiliser les ddl offerts par la redondance de la tâche pour réaliser un objectif secondaire. Le formalisme des tâches redondantes offre un cadre mathématique bien connu des roboticiens pour résoudre ce problème [Samson et al. 1991], [Nakamura 1991]. L'idée consiste à modifier la trajectoire articulaire en rajoutant à l'expression nominale du contrôleur donnée par (4.5) ou (4.10), un terme secondaire appartenant au noyau de la jacobienne de la tâche principale³. L'expression générale du contrôleur devient alors :

$$\dot{q} = J_e^{W+} \dot{x} + \Pi \alpha$$

où, $\Pi = I_n - J_e^{W+} J_e$ est l'expression du projecteur de \mathbb{R}^n dans le noyau de J_e avec I_n la matrice identité d'ordre n , et $\alpha \in \mathbb{R}^n$ est un vecteur dont le choix approprié permet de réaliser la tâche secondaire sans perturber l'exécution de la tâche principale. On ne peut cependant pas garantir que la redondance permettra la réalisation complète de la tâche secondaire. La commande doit donc permettre de garantir l'exécution de la tâche principale et de réaliser au mieux la tâche secondaire. Une explication de cette approche peut être trouvée dans [Baerlocher et Boulic 2003]. Dans la suite, nous allons utiliser ce formalisme de priorité de tâches pour réaliser le mouvement d'atteinte tout en garantissant la satisfaction de la tâche de fixation.

4.3.5 Contrôleur des deux tâches

A partir de ces différents formalismes que nous venons de présenter, nous allons maintenant définir l'expression complète du contrôleur de notre chaîne arborescente pour l'exécution des tâches de fixation et d'atteinte.

Il nous faut choisir une tâche prioritaire. Ce choix est arbitraire. Cependant, notre but est de simuler notre modèle selon le même protocole que [Jouffrais et al. 2000] présenté dans la section 4.2.1. L'enregistrement des données électrophysiologiques n'était validé qu'à la condition que la fixation soit maintenue durant tout le geste d'atteinte. C'est pourquoi, nous définissons la tâche e_1 comme la tâche prioritaire de fixation et la tâche e_2 comme la tâche d'atteinte de la cible avec la main.

Pour mettre en œuvre le formalisme de priorité de tâches, toutes les variables articulaires doivent être prises en compte dans les MCD. C'est à dire que les équations (4.7) et (4.8) doivent tenir compte des articulations du tronc, du bras et de la tête. Nous augmentons alors ces dernières en définissant $q = [q_o; q_t; q_a]^t$ comme le vecteur des variables articulaires de notre mannequin. On obtient ainsi :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = J_1 \dot{q} + \frac{\partial e_1}{\partial t} \\ \dot{e}_2 = J_2 \dot{q} + \frac{\partial e_2}{\partial t} \end{cases} \quad (4.11)$$

3. Pour une configuration donnée de la chaîne cinématique, le noyau de la jacobienne est l'ensemble des variations articulaires infinitésimales \dot{q} de la chaîne qui n'entraînent pas de variation de la tâche. En d'autres termes, c'est l'ensemble des $\dot{q} \in \mathbb{R}^n$ qui vérifient $J_e \dot{q} = 0$

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

Où, J_1 et J_2 sont les matrices jacobiennes augmentées de J_{e_1} et J_{e_2} respectivement et, $\frac{\partial e_1}{\partial t}$ et $\frac{\partial e_2}{\partial t}$ expriment respectivement un mouvement propre de la cible visuelle et de la cible à atteindre.

A présent, nous pouvons définir l'expression générale du contrôleur pour la tâche de fixation (eq. 4.11-ligne 1). Nous obtenons le modèle cinématique inverse (MCI) W-pondérée suivant :

$$\dot{q} = J_1^{W+} \tilde{e}_1 + \Pi \alpha \quad (4.12)$$

Dans l'équation (4.12), \tilde{e}_1 est la variation temporelle dans l'espace opérationnel de la fonction de tâche e_1 prenant en compte le déplacement possible de la cible visuelle ($\tilde{e}_1 = e_1 - \frac{\partial e_1}{\partial t}$). Aussi, dans cette même équation, l'expression du projecteur de \mathbb{R}^{15} dans le noyau de J_1 est $\Pi = (I_{15} - J_1^{W+} J_1)$ où I_{15} est la matrice identité de dimension 15 (nombre total des degrés de liberté de notre mannequin). Nous allons choisir le vecteur α de manière à ce que ce contrôleur exécute, au mieux, la tâche d'atteinte tout en assurant la tâche de fixation.

Pour cela, on substitue l'équation (4.12) dans le MCD augmenté lié à la seconde tâche (eq. 4.11-ligne 2). On obtient alors :

$$\tilde{e}_2 = J_2 (J_1^{W+} \tilde{e}_1 + \Pi \alpha)$$

Où \tilde{e}_2 est la variation temporelle dans l'espace opérationnel de la fonction de tâche e_2 prenant en compte le déplacement possible de la cible à atteindre ($\tilde{e}_2 = e_2 - \frac{\partial e_2}{\partial t}$). A partir de l'équation précédente, on déduit l'expression de α :

$$\alpha = (J_2 \Pi)^{W+} (\tilde{e}_2 - J_2 J_1^{W+} \tilde{e}_1) \quad (4.13)$$

Enfin, l'expression du contrôleur complet pour l'exécution des deux tâches est obtenue en injectant la solution de α , donnée par (4.13), dans l'équation du MCI généralisé de la tâche prioritaire (eq. 4.12).

$$\dot{q} = J_1^{W+} \tilde{e}_1 + \Pi (J_2 \Pi)^{W+} (\tilde{e}_2 - J_2 J_1^{W+} \tilde{e}_1)$$

Comme le projecteur Π est hermitien et idempotent (projection orthogonale), on peut simplifier l'écriture de notre contrôleur complet comme ceci :

$$\dot{q} = J_1^{W+} \tilde{e}_1 + (J_2 \Pi)^{W+} (\tilde{e}_2 - J_2 J_1^{W+} \tilde{e}_1) \quad (4.14)$$

En injectant la tâche d'atteinte dans le noyau de la tâche de fixation e_1 , nous venons d'exprimer la solution finale du contrôleur pour réaliser les deux tâches de fixation et d'atteinte. La seule condition est que la redondance de notre modèle soit assez forte pour garantir leur compatibilité. En effet, si la tâche de fixation est garantie, ce n'est pas forcément le cas de la tâche d'atteinte.

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

Le formalisme de l'asservissement visuel permet de prendre en compte les mouvements propres de la cible visuelle au travers du terme $\frac{\partial e_1}{\partial t}$ et de la cible d'atteinte au travers de $\frac{\partial e_2}{\partial t}$ que nous avons intégrés dans \tilde{e}_1 et \tilde{e}_2 respectivement. La cible visuelle est le centre de la caméra qui ne peut bouger indépendamment d'elle-même. De plus, la tâche de fixation étant prioritaire, on en déduit que la variation propre de la cible visuelle est impossible. Le terme $\frac{\partial e_1}{\partial t}$ est donc un vecteur nul de dimension 2.

Notre objectif principal est de montrer que si la loi de commande d'un geste d'atteinte basée sur un vecteur de différence main-cible exprimé dans le référentiel oculocentré est nécessairement dépendante de toutes les articulations de la chaîne cinématique entre l'œil et la main. Pour démontrer cette dépendance, nous avons considéré que le sujet n'utilise que la partie haute du corps pour réaliser le geste d'atteinte tout en contrôlant également la direction de son regard (modèle illustré sur la figure 4.6). Pour cela nous avons expliqué comment le formalisme des tâches prioritaires permet de synthétiser ces deux lois de commande. Cependant, ce formalisme ne permet pas d'exprimer de manière séparée le contrôleur pour chacune des deux tâches. Pour atteindre clairement cet objectif, nous proposons de séparer les deux chaînes cinématiques afin d'exprimer un contrôleur pour chaque tâche. Mais avant de présenter cette solution, nous allons définir, dans la section suivante, la dynamique associée aux deux fonctions de tâches e_1 et e_2 . Le choix de cette dynamique est complètement arbitraire et ne joue aucun rôle dans notre objectif principal.

4.3.6 Dynamique des deux tâches

Pour simuler la commande des deux tâches (atteinte et fixation), nous devons définir la stratégie dynamique pour annuler les deux fonctions de tâches. Nous proposons de mettre en œuvre des stratégies bio-inspirées.

-La tâche de fixation : Le but de la fonction de tâche de fixation est d'assurer une convergence rapide de l'orientation de la caméra vers la cible visuelle. Pour cela une solution classique en robotique est d'utiliser une décroissance exponentielle. Rappelons que la fonction de tâche de fixation s'écrit :

$$e_1 = s_F - s_{F^*}$$

Si l'on considère que s_{F^*} est la projection souhaitée du point de fixation au centre de l'image de la caméra, alors $s_{F^*} = 0$. La fonction de tâche s'écrit alors : $e_1 = s_F$. La décroissance exponentielle de cette tâche s'écrit :

$$\dot{e}_1 = -\lambda e_1$$

Où $\lambda > 0$ permet de régler la vitesse de décroissance.

- La tâche d'atteinte : Le but de la fonction de tâche pour le geste d'atteinte est d'asservir la main de notre mannequin jusqu'à une position cible. Beaucoup de modèles ont été développés

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

pour décrire le mouvement d'atteinte [Flash et Hogan 1985], [Uno et al. 1989], [Hoff et Arbib 1993], [Harris et Wolpert 1998] ou encore [Guigon et al. 2007]. Nous choisissons de mettre en œuvre un modèle qui minimise le jerk au cours du geste. Ce critère de minimisation de la dérivée de l'accélération est une manière simple et réaliste de reproduire des mouvements ressemblants à ceux de l'homme.

Rappelons-nous que la fonction de tâche d'atteinte s'écrit :

$$e_2 = s_H - s_T = -x_{dv}$$

Où s_H et s_T sont les projections sur le plan de la caméra de la position de la main et de la cible, respectivement. Le terme x_{dv} représente le vecteur de différence exprimé dans le référentiel oculocentré. La variation de cette fonction de tâche est obtenue à l'aide d'une adaptation du modèle de [Hoff et Arbib 1993]. Ce dernier permet de calculer l'état de la main de manière itérative. Les entrées du modèle sont la position x_t , la vitesse v_t et l'accélération a_t de la main à l'instant t , la durée restante D du mouvement et la position finale x_f de la main. La dynamique du modèle de Hoff et Arbib s'écrit de la manière suivante :

$$s_{t+1} = A s_t + B x_f$$

Où $s_t = [x_t, v_t, a_t]^t$ est l'état du système à l'instant t et, A et B sont respectivement les matrices d'état et de commande définis comme suit :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -60/D^3 & -36/D^2 & -9/D \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 60/D^3 \end{bmatrix}$$

Où $D = t_f - t$ est la durée restante du mouvement à l'instant t . Cette durée peut être déterminée en fonction de la distance restante à parcourir pour atteindre la cible et d'un coefficient qui traduit un compromis entre rapidité et régularité dans l'exécution du mouvement [Hoff 1994]. Dans notre cas d'étude, les positions à atteindre sont toutes à égale distance, ce qui nous permet de fixer de manière constante le nombre total d'itérations nécessaire.

Cette dynamique permet de simuler un mouvement quasi-rectiligne de la main sous la condition du minimum jerk. Nous avons adapté ce système en considérant que la variable x représente la norme euclidienne du vecteur de différence x_{dv} et que v_t et a_t sont respectivement la variation en vitesse et en accélération de cette norme entre les temps $t - 1$ et t . Avec cette modification, le modèle de Hoff et Arbib détermine l'évolution de la norme du vecteur de différence en minimisant les variations de l'accélération. La variation de la norme est ensuite utilisée pour calculer le déplacement de la main en coordonnées cartésiennes oculocentrées ΔX à l'aide de la

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

formule suivante :

$$\Delta X = v_{t+1} \frac{x_{dv}}{\|x_{dv}\|} \Delta t$$

Maintenant que les stratégies dynamiques associées à nos deux fonctions de tâches sont décrites, nous pouvons revenir à la démonstration de notre objectif principal qui concerne l'effet de la position du regard sur le contrôleur de la main.

4.3.7 Effet de la position du regard sur le contrôleur de la main

Notre modèle, illustré sur la figure 4.6, se veut général vis-à-vis des articulations sollicitées lorsque l'on exécute un mouvement d'atteinte et/ou de fixation. Le contrôleur qui en résulte est décrit par l'équation (4.14). Cependant pour modéliser la tâche de [Jouffrais et al. 2000], on peut considérer que le tronc est fixe puisque l'animal est assis avec la tête maintenue fixe. De ce fait, on peut écarter la difficulté d'avoir à gérer l'existence de liaisons communes aux deux chaînes q_1 et q_2 . Les tâches de fixation et d'atteinte sont naturellement découplées. Ce modèle simplifié est montré dans la figure 4.7.

Les fonctions de tâches de fixation et d'atteinte s'expriment comme précédemment :

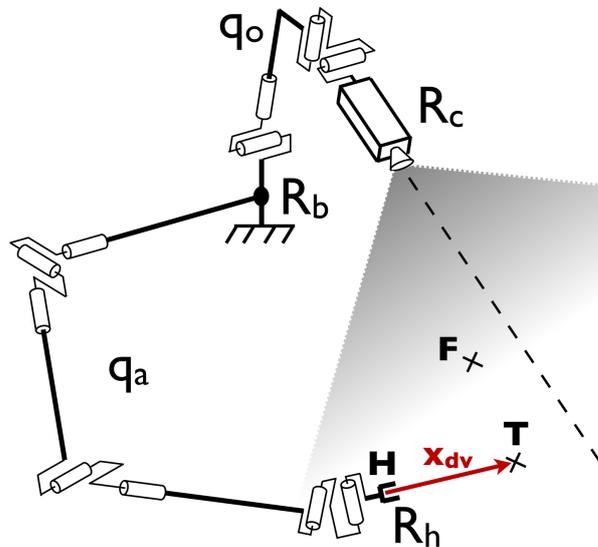


FIGURE 4.7 – Représentation d'un modèle cinématique simplifié du bras et de la tête. Modèle cinématique des articulations du bras q_a (épaule, coude et poignet) et de la tête q_o (cou et œil). Les référentiels liés à la caméra, la main et la base de notre modèle sont notés R_c , R_h et R_b respectivement. Le vecteur de différence entre la position de la main H et la position de la main désirée T est noté x_{dv} . La position de la cible visuelle est noté F .

$$\begin{cases} e_1 = s_F - s_{F^*} \\ e_2 = s_H - s_T \end{cases}$$

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

Nous pouvons ensuite écrire les deux modèles cinématiques directs (MCD) associés aux deux tâches, en accord à (4.2) :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = J_{e_1} \dot{q}_o + \frac{\partial e_1}{\partial t} \\ \dot{e}_2 = J_{e_2} \dot{q}_a + \frac{\partial e_2}{\partial t} \end{cases} \quad (4.15)$$

$\frac{\partial e_1}{\partial t}$ et $\frac{\partial e_2}{\partial t}$ expriment un mouvement potentiel de la cible visuelle et d'atteinte respectivement. Les matrices jacobiennes J_{e_1} et J_{e_2} que nous avons précédemment définies aux équations (4.3) et (4.4) s'expriment :

$$\begin{cases} J_{e_1} = L_{SF} {}^cV_b {}^bJ(q_o) \\ J_{e_2} = -L_{SH} {}^cV_b {}^bJ(q_a) \end{cases} \quad (4.16)$$

On rappelle que dans ces deux expressions, L_{SF} et L_{SH} sont les matrices d'interaction associées à la projection des points F et H respectivement. La matrice cV_b décrit la transformation entre le référentiel de la caméra R_c et le référentiel de base R_b . Enfin, ${}^bJ(q_o)$ et ${}^bJ(q_a)$ sont les matrices jacobiennes respectivement associées aux articulations de la tête et du bras et sont exprimées dans le référentiel de la base R_b de notre modèle (voir fig. 4.7).

Puisque nos deux chaînes cinématiques sont distinctes, nous pouvons calculer les contrôleurs sans utiliser le formalisme de priorité de tâches. Cela revient à calculer le modèle cinématique W-pondéré associé à chacune des tâches.

Finalement, les deux contrôleurs s'expriment ainsi :

$$\begin{cases} \dot{q}_o = J_o^{W+} \left(\dot{e}_1 - \frac{\partial e_1}{\partial t} \right) \\ \dot{q}_a = J_a^{W+} \left(\dot{e}_2 - \frac{\partial e_2}{\partial t} \right) \end{cases} \quad (4.17)$$

Où J_o^{W+} et J_a^{W+} sont respectivement les matrices pseudo-inverses W-pondérée des matrices jacobiennes des paramètres visuels associées aux articulations de la tête (J_{e_1}) et du bras (J_{e_2}). Le calcul d'une matrice pseudo-inverse W-pondérée a déjà été décrit dans la section 4.3.4 à l'équation (4.9).

Le système d'équation 4.17 décrit les contrôleurs pour l'exécution d'une tâche de fixation et/ou d'une tâche d'atteinte. On peut noter que leurs expressions sont plus simple que pour notre modèle général. A partir de ces équations, nous allons montrer que l'expression du contrôleur du geste d'atteinte dépend de l'ensemble des articulations associées aux yeux et au cou. L'expression complète de ce contrôleur est la suivante :

$$\dot{q}_a = W J_{e_2}^t (J_{e_2} W J_{e_2}^t)^{-1} \left(\dot{e}_2 - \frac{\partial e_2}{\partial t} \right)$$

Les éléments qui interviennent dans ce contrôleur sont :

- La matrice jacobienne des paramètres visuels J_{e_2} et

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

- la prise en compte d'un éventuel mouvement de la position de la cible à atteindre $\frac{\partial e_2}{\partial t}$.

Rappelons que l'expression explicite du premier élément s'écrit :

$$J_{e_2} = -L_{s_H} {}^cV_b {}^bJ(q_a)$$

Où le premier terme, L_{s_H} , exprime le torseur d'interaction qui ne dépend que de la projection de la position de la main sur le plan de la caméra (voir eq. 4.6). Le second terme est la matrice cV_b qui exprime la transformation entre le référentiel de la caméra R_c et celui de la base de la chaîne cinématique lié au bras R_b . Cette matrice est calculée à partir de la chaîne cinématique de la tête (œil + cou). Bien que cette matrice peut ne pas varier au cours d'un geste d'atteinte, elle dépend néanmoins de l'orientation de la caméra dans l'expression de cV_b . Finalement, le troisième et dernier terme intervenant dans la matrice jacobienne des paramètres visuels J_{e_2} est la matrice jacobienne de la chaîne cinématique du bras ${}^bJ(q_a)$ qui ne dépend donc que des articulations du bras q_a . En conclusion, il apparaît que cette matrice jacobienne des paramètres visuels J_{e_2} dépend des articulations des yeux/tête et de la tête/tronc au travers de la matrice de transformation cV_b . Ainsi le contrôleur de la main, lorsque la fonction de tâche est définie dans le référentiel oculocentré, dépend explicitement des articulations des yeux et du cou.

Le deuxième élément qui intervient dans ce contrôleur d'atteinte exprime une variation propre de la fonction de tâche e_2 . Comme la cible à atteindre est supposée fixe, la variation de e_2 ne peut résulter que du déplacement de la caméra dû à la tâche de fixation. Elle s'écrit :

$$\begin{aligned} \frac{\partial e_2}{\partial t} &= \frac{\partial e_2}{\partial q_o} \dot{q}_o \\ &= (L_{s_H} - L_{s_T}) {}^cV_b {}^bJ(q_o) J_o^{W+} \dot{e}_1 \\ &= (L_{s_H} - L_{s_T}) {}^cV_b {}^bJ(q_o) [L_{s_F} {}^cV_b {}^bJ(q_o)]^+ \dot{e}_1 \end{aligned}$$

Cette expression comporte trois termes. Le premier fait appel aux torseurs d'interaction $(L_{s_H} - L_{s_T})$ et ne dépendent pas des articulations des yeux ou du cou. En revanche, les deux autres termes qui sont la matrice de transformation cV_b et la matrice jacobienne associée à la chaîne cinématique de la tête ${}^bJ(q_o)$ sont tous les deux fonctions des articulations des yeux et du cou. En conclusion, le deuxième élément de notre contrôleur d'atteinte est également dépendant des articulations des yeux et du cou lorsque la caméra est en mouvement.

Nous pouvons donc conclure qu'au travers des termes cV_b et ${}^bJ(q_o)$ le contrôleur de la main permettant d'exécuter le mouvement d'atteinte dépend explicitement des liaisons de la tête/tronc et des yeux/tête. Rappelons que les termes cV_b et ${}^bJ(q_o)$ qui représentent, respectivement, la matrice de transformation entre le référentiel de la caméra et celui de la base de la matrice

jacobienne du robot associée aux articulations de la tête. Ces mêmes termes interviennent dans l'expression du contrôleur du geste d'atteinte dans le cas général (eq. 4.14) mais l'existence de liaisons communes aux chaînes q_1 et q_2 pouvait être source de confusion. Ici, l'utilisation de lois de commandes découplées pour la tâche de fixation et le mouvement d'atteinte permet d'apporter une preuve claire.

4.4 Modélisation du contrôleur d'atteinte avec un réseau de neurones artificiels

A l'aide du formalisme de l'asservissement visuel, nous venons de montrer que, dès lors que le vecteur de différence main-cible est exprimé dans le référentiel visuel, la loi de commande du geste d'atteinte dépend naturellement de l'ensemble des liaisons de la chaîne main-œil. Cette analyse cinématique fournit un argument computationnel pour interpréter l'activité du SNC associée au contrôle de gestes d'atteinte. Chez le primate, il a été montré que le cortex prémoteur dorsal (PMd) est impliqué dans le calcul des plans moteurs et processus sensorimoteurs [Bous-saoud et Wise 1993]. Par analogie avec l'expression du contrôleur d'atteinte, si le vecteur de différence est exprimé en coordonnées oculocentrées, on peut s'attendre à ce que l'activité d'une large partie des neurones du cortex prémoteur soit modulée par la direction du regard.

En neurosciences, les réseaux de neurones artificiels (RDNa) sont couramment utilisés pour modéliser des processus d'intégration multisensorielle et sensorimoteurs. Les travaux consistent à développer un RDNa pour simuler l'activité neuronale distribuée afin de tester un modèle. La simulation d'un RDNa permet de comparer l'activité des neurones artificiels présents dans le RDNa avec celle des neurones enregistrées au sein du SNC. Cette comparaison valide ou infirme l'hypothèse initiale. Par exemple, beaucoup d'auteurs ont proposé des modèles de RDNa pour reproduire les processus de transformations de coordonnées, à partir d'un référentiel oculocentré vers craniocentré ou corps-centré [Zipser et Andersen 1988], [Xing et Andersen 2000], [Blohm et al. 2009]. Cette approche offre un cadre computationnel aux chercheurs en neurosciences. [Zipser et Andersen 1988] ont ainsi mis en évidence la participation de la position des yeux lors de transformations de coordonnées entre les référentiels oculocentré et craniocentré. La comparaison de l'activité interne au RDNa avec celle enregistrée dans le cortex pariétal offre une interprétation sur le codage dans un référentiel intermédiaire de certains neurones biologiques enregistrés. Les résultats obtenus par la simulation de RDNa sont en accord avec des enregistrements électrophysiologiques issus du cortex pariétal postérieur et renforcent l'idée que cette aire du cortex est impliquée dans l'intégration multisensorielle et la boucle visuomotrice.

Basés sur cette même approche, nous avons développé un RDNa pour simuler un contrôleur cinématique du bras avec fixation du regard imposée comme dans la tâche expérimentale de

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

[Jouffrais et al. 2000] (voir section 4.2). Ainsi nous allons comparer l'activité des neurones artificiels présents dans notre RDNa avec l'activité neuronale enregistrée dans l'aire PMd. Cette section est organisée de la manière suivante. Tout d'abord nous définissons le modèle cinématique et le contrôleur d'atteinte correspondant pour simuler des gestes d'atteinte identiques à ceux réalisés par l'animal lors de l'étude de [Jouffrais et al. 2000]. Nous présentons ensuite l'architecture du RDNa choisi. Puis, nous expliquons la stratégie mise en place pour sa phase d'apprentissage. Enfin nous le simulons pour recueillir l'activité des neurones artificiels et la comparons à celle rapportée par [Jouffrais et al. 2000].

4.4.1 Modèle cinématique et contrôleur

Jusqu'à présent, nous avons volontairement développé des modèles cinématiques simples mais généraux. Le contrôleur lié au premier modèle, illustré dans la figure 4.6, permet d'exécuter une tâche d'atteinte et/ou une tâche de fixation en utilisant tous les degrés de liberté de la partie haute de notre mannequin. Le bassin est considéré comme fixe. Le second modèle, illustré sur la figure 4.7, nous a permis de décrire séparément le contrôleur d'atteinte et le contrôleur pour orienter la caméra. Comme dans le premier modèle, ces deux contrôleurs nous permettent de réaliser une tâche d'atteinte et/ou de fixation mais avec une limitation plus forte. En effet, le tronc dans le second modèle est considéré fixe. Cette contrainte a pour effet de réduire l'espace d'atteinte.

Dans l'étude expérimentale de [Jouffrais et al. 2000], présentée dans la section 4.2, trois paramètres sont à prendre en compte. Le premier est que l'animal est assis dans une chaise pour primate. Ainsi, le bassin peut être considéré fixe. Le deuxième paramètre est que la tête de l'animal est maintenue fixe. Associé au premier paramètre, on peut considérer que le tronc et les articulations au niveau du cou sont fixes et alignés par rapport à l'écran. Le troisième et dernier paramètre est que nous nous intéressons seulement à la période pendant laquelle l'animal exécute un geste d'atteinte et qu'il fixe déjà une cible visuelle. L'ensemble de ces paramètres permet de considérer que le modèle cinématique le plus approprié est le système "eye-to-hand" présenté dans la section 4.3.1 et illustré dans la figure 4.4-B. La caméra étant fixe pendant le mouvement, on en conclut que la caméra est déportée et initialement orientée vers la cible désirée. En accord avec les équations (4.15-ligne 2) et (4.16-ligne 2), le contrôleur cinématique de la main s'écrit directement et simplement :

$$\dot{q}_a = \left(-L_{sH} {}^cV_b {}^bJ(q_a) \right)^{W^+} \dot{e}_2, \quad (4.18)$$

où l'expression $\left(-L_{sH} {}^cV_b {}^bJ(q_a) \right)^{W^+}$ exprime la matrice pseudo-inverse W-pondérée des paramètres visuels et \dot{e}_2 est défini par la dynamique de minimum jerk donnée par le modèle de Hoff décrit à la section 4.3.6 ($e_2 = -x_{dv} = s_H - s_T$). On peut noter que le terme $\frac{\partial e_2}{\partial t}$ présent

dans l'équation (4.15-ligne 2), qui exprime un mouvement potentiel de la position de la cible dans le plan de la caméra, est nul puisque la caméra et la cible à atteindre sont fixes dans l'environnement. L_{sH} est la matrice d'interaction associée à la projection de la position de la main H . cV_b est la matrice de transformation entre le référentiel de la caméra R_c et la base R_b de la chaîne cinématique associée au geste d'atteinte. On peut noter que cette matrice est constante pendant la réalisation de gestes d'atteinte mais différente pour chaque orientation de la caméra. Pour rappel, la matrice cV_b est dépendante des degrés de liberté associés à la caméra (les degrés de liberté du cou étant constants). ${}^bJ(q_a)$ est la matrice jacobienne du bras.

4.4.2 Description du réseau de neurones artificiels

A l'aide des formalismes de la robotique et des hypothèses que nous avons considérées, nous avons exprimé le contrôleur d'atteinte le plus approprié pour reproduire la tâche expérimentale décrite dans l'étude de [Jouffrais et al. 2000]. Nous allons maintenant décrire un RDNa qui va nous permettre de comparer l'activité des neurones artificiels présents dans ce RDNa avec l'activité des neurones enregistrés dans l'étude de [Jouffrais et al. 2000]. Ce RDNa qui doit approximer notre contrôleur va être réalisé à l'aide d'un ensemble de neurones artificiels visant à modéliser le comportement computationnel d'une population de neurones biologiques au sein du SNC (pour exemple : [Zipser et Andersen 1988], [Xing et Andersen 2000], [Blohm et al. 2009]).

Le RDNa que nous mettons en œuvre est de type formel et statique. Il existe un très grand nombre d'architectures possibles. Néanmoins, plusieurs paramètres tels que le nombre de couches, le type de connectivité entre les neurones artificiels, le nombre de neurones, la fonction d'activation de ces derniers et l'algorithme d'apprentissage de la relation entrée/sortie vont nous guider dans le choix de cette architecture.

Avant de présenter plus en détails ces différents paramètres, nous pouvons reporter la définition d'un neurone artificiel (illustration Fig. 4.8). Un neurone artificiel est une fonction non-linéaire, paramétrée et à valeur bornée que l'on peut écrire sous la forme :

$$y_j = g \left(w_0 + \sum_{n=1}^N w_{ni} x_{ni} \right)$$

Où $y_j \in \mathbb{R}$ est la valeur de sortie du neurone artificiel de la couche j . La fonction d'activation est notée g . Une constante w_0 , nommée "biais", est ajoutée à la somme pondérée pour accélérer et améliorer la convergence de l'apprentissage de la relation entrées-sorties. Les N entrées venant de la couche précédente i sont notées x_{ni} . Elles sont pondérées par les N poids notés w_{ni} . Le biais et les poids sont les variables intrinsèques à un RDNa. La phase d'apprentissage permet de les modifier afin que le RDNa approxime au mieux la relation entrée/sortie. Les fonctions d'activation de la première et dernière couche sont linéaires. La relation entre les variations de la

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

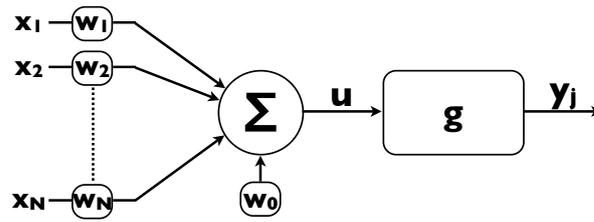


FIGURE 4.8 – Représentation d’un neurone artificiel. “ x ” sont les entrées du neurone artificiel. “ w ” sont les poids associés à chaque entrée. “ w_0 ” est le biais. “ u ” est la somme pondérée. “ g ” est la fonction d’activation du neurone artificiel et “ y_j ” est sa sortie

fonction de tâche e_2 (variables d’entrées de notre contrôleur) et les variations articulaires \dot{q}_a (variables de sorties de notre contrôleur) n’est pas linéaire. Dans ce type de cas, une, au minimum, ou plusieurs couches intermédiaires sont requises et appelées couches cachées. Le nombre de ces couches cachées augmente le nombre de poids et biais à ajuster et donc, augmente le temps de convergence lors de la phase d’apprentissage. Il est alors préférable de minimiser ce nombre de couches intermédiaires. Pour notre RDNa, une seule couche intermédiaire est suffisante. Chaque sortie du RDNa est alors une combinaison linéaire de fonctions non-linéaires des paramètres de la couche d’entrée que l’on peut écrire comme ceci :

$$\dot{q}_{ak} = w_{k0} + \sum_{j=1}^J w_{kj} \left[g \left(w_{kj0} + \sum_{i=1}^I w_{ji} x_i \right) \right]$$

La couche d’entrée de notre RDNa se compose des 7 variables articulaires du bras q_a , des 2 variables articulaires liées à la caméra q_0 et des 3 composantes de la commande dynamique du geste d’atteinte e_2 . Le vecteur des paramètres d’entrées, de dimension 12, est noté x . Le vecteur de paramètres de sorties sont les 7 variations des articulations du bras \dot{q}_a .

L’étendue des valeurs que peuvent prendre les entrées doit être la plus homogène possible. Les angles des variables articulaires sont exprimés en radians. En sortie de notre RDNa, les variations des variables articulaires liées au bras sont également exprimées en radians. Au sein de la couche intermédiaire, le choix de la fonction d’activation g dépend de deux critères. Le premier est que nous voulons reproduire un fonctionnement “neuronal” ce qui entraîne que l’activité en sortie de la couche intermédiaire ne peut être négative ($y_j > 0$). Le second critère est que pour appliquer un algorithme classique d’apprentissage, la fonction d’activation doit être dérivable. Notre choix se porte sur une fonction de transfert courante qui est la fonction “log-sig” défini par l’expression suivante :

$$g(u) = \frac{1}{1 + e^{-u}}$$

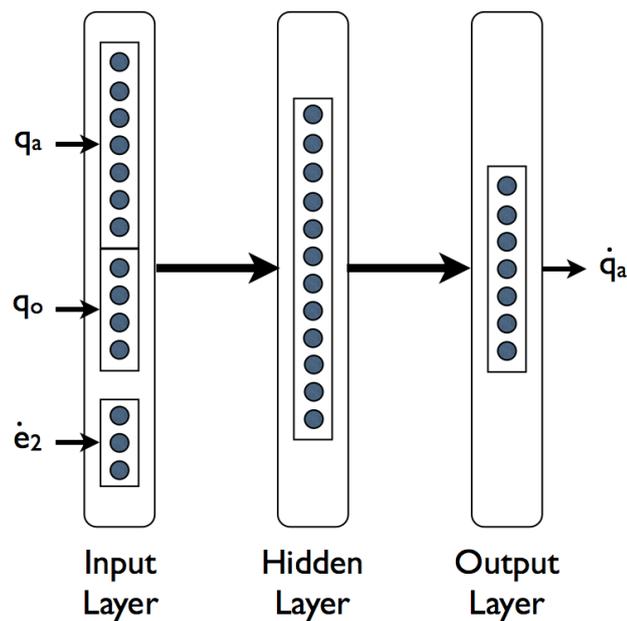


FIGURE 4.9 – Représentation schématique du réseau de neurones artificiels

La connexion entre les neurones est choisie sans rétroaction, boucle ou récurrence comme on peut en rencontrer dans plusieurs études comme [Smith et Crawford 2005] et [Blohm et al. 2009]. Le nombre de neurones artificiels présents dans la couche intermédiaire est arbitraire. Il n'existe aucune règle précise sur ce point. Néanmoins, moins il y aura de neurones artificiels et moins il y aura de paramètres à régler ce qui entraînera une convergence plus rapide de la relation entrée/sortie. Après avoir fait l'apprentissage de différents RDNa, nous avons sélectionné celui comportant le moins de neurones artificiels dans la couche cachée, c'est-à-dire 12 neurones artificiels. La représentation schématique de notre RDNa est illustrée sur la figure 4.9. Le RDNa a été implémenté à l'aide du logiciel Matlab en utilisant la boîte à outils des réseaux de neurones artificiels.

4.4.3 L'apprentissage du RDNa

Nous venons de définir l'architecture de notre RDNa. L'étape suivante et présentée dans cette section est de l'entraîner afin qu'il réalise, au mieux, la relation entrée/sortie désirée. L'apprentissage d'un RDNa est un problème numérique d'optimisation. Celui-ci revient à estimer les variables intrinsèques du RDNa (poids et biais) pour lesquelles la fonction des moindres carrés, calculée sur l'ensemble du jeu de données entrées-sorties, est minimale. Nous avons fixé la fin de l'entraînement à partir du moment où l'évolution de la racine carrée de l'erreur quadratique (RMSE) n'était plus perceptible, le gradient devenant inférieur à $< 10^{-6}$ (critère utilisé également par [Blohm et al. 2009]). Il existe beaucoup d'algorithmes d'apprentissage qui recherchent à minimiser l'erreur engendrée par les poids et les biais sur la valeur de sor-

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

tie des neurones artificiels. Nous avons utilisé l'algorithme de Levenberg-Marquardt qui est l'algorithme recommandé pour sa rapidité de convergence bien qu'il requiert plus de mémoire que les autres algorithmes [Hagan et Demuth 1999]. La relation entre les entrées et les sorties est connue grâce à notre contrôleur développé à la section précédente. Ainsi, l'apprentissage de cette relation en est simplifié à condition que le jeu de données entrées-sorties soit suffisamment important et général. La génération de ce jeu de données nécessite une stratégie particulière que nous développons ci-dessous après un rapide rappel de la tâche pour laquelle nous allons simuler notre RDNa.

La tâche expérimentale que nous désirons reproduire est illustrée sur la figure 4.10. Initialement, notre mannequin fixe une des neuf cibles visuelles (cible bleue dans la figure) et touche la cible centrale (cible blanche dans la figure). La tâche demandée est alors de maintenir le regard vers la cible visuelle tout en réalisant un geste d'atteinte vers une cible excentrée (cible verte dans la figure). Les entrées de notre RDNa sont la configuration des 7 variables articulaires présentes dans la chaîne cinématique du bras, la configuration des 2 variables articulaires associées à la caméra et les 3 composantes de la dynamique associées au vecteur de différence. Les variables articulaires associées au cou ne sont pas nécessaires puisqu'elles sont constantes et nulles dans toute l'étude. Les sorties sont les variations des 7 variables articulaires du bras de manière à ce qu'il se déplace selon la dynamique définie en entrée. En résumé, la simulation de notre RDNa sera réalisée dans un plan 2D selon 72 combinaisons possibles (8 mouvements \times 9 points de fixations). Chacun de ces mouvements seront réalisés en 50 itérations.

Nous ne pouvons pas nous limiter aux configurations présentes dans la tâche expérimentale pour l'apprentissage car nous risquons fortement de biaiser l'apprentissage du contrôleur. Par exemple, le fait que les différents gestes d'atteinte soient définis dans un plan 2D ou encore que les mouvements ne soient réalisés que selon huit directions différentes pourrait biaiser l'apprentissage à un fonctionnement purement 2D et selon les 8 directions du RDNa. De manière à éviter ces problèmes, nous avons enregistré les 3600 configurations possibles du bras et de la direction de la caméra (72 combinaisons \times 50 itérations) et nous les avons associées de manière aléatoire à 3600 vecteurs unitaires uniformément distribués sur une surface sphérique. Cet ensemble de vecteurs a été calculé à partir de trois variables aléatoires correspondant aux trois coordonnées cartésiennes que nous avons ensuite normalisées. A partir de ce jeu d'entrées, le jeu de sorties correspondant a été calculé grâce au contrôleur du modèle simplifié (éq. 4.17).

Parmi les 3600 entrées-sorties, 60% sont utilisés pour ajuster les poids et les biais en fonction de la sortie générée par le RDNa, 20% servent à tester l'apprentissage et les autres 20% valident l'apprentissage du RDNa. On pourra noter que l'initialisation des poids et biais a été réalisée de manière aléatoire et qu'il a nécessité l'entraînement d'une vingtaine de RDNa avant qu'il soit possible d'approximer correctement la fonction de notre contrôleur. La recherche de minimum d'erreur engendrée par les poids et les biais semble très sensible à l'initialisation de ces paramètres. De plus, nous avons testé différentes architectures (de 5 à 20 neurones dans la couche

cachée). Celui comprenant 12 neurones artificiels dans la couche cachée et dont les résultats sont présentés dans la section suivante a montré la meilleure approximation de notre contrôleur.

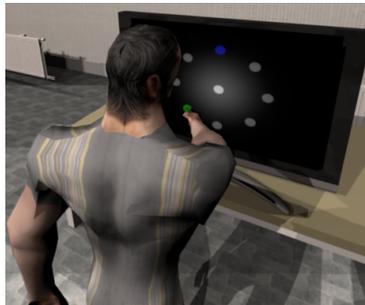


FIGURE 4.10 – Illustration d'un geste d'atteinte avec un mannequin virtuel. Il fixe la cible bleue et déplace sa main de la cible centrale (blanche) vers la cible excentrée (verte).

4.4.4 Résultat

Suite à l'apprentissage de plusieurs RDNa, nous présentons, dans cette section, celui exécutant au mieux la relation entrée/sortie de notre contrôleur d'atteinte décrite à la section précédente. Ce RDNa comporte 12 neurones artificiels dans sa couche cachée. Notre but est d'étudier l'activité de ces 12 neurones artificiels lors de l'exécution de la tâche comportementale de [Jouffrais et al. 2000] présentée à la section 4.2. Pour faciliter la lecture et la compréhension de nos résultats, nous avons attribué à chaque cible un numéro (voir figure 4.11). Comme dans l'étude de Jouffrais et al., les cibles 1 à 8 sont des cibles à atteindre et/ou à fixer. La cible 9 centrale correspond à la position initiale de la main pour chaque geste d'atteinte. Dans la suite, nous considérons toutes les positions (organe terminal et cibles) comme des points ponctuels. Pour étudier l'activité interne de notre RDNa, nous commençons par valider la réalisation de la tâche expérimentale lorsque le contrôleur est remplacé par ce RDNa.

4.4.4.1 Validation du réseau de neurones artificiels

Ce RDNa a été entraîné pour être capable de calculer les variations angulaires des articulations du bras lorsque la consigne de déplacement de l'organe terminal est définie dans n'importe quelle direction de l'espace 3D. Nous pouvons observer sur la figure 4.12 les 64 trajectoires de la main lors de la simulation complète de la tâche expérimentale (8 cibles à atteindre \times 8 cibles à fixer). Dans cette section, nous validons l'exécution de la tâche comportementale selon plusieurs critères (erreur d'atteinte, erreur sur les trajectoires, vitesse de l'organe terminal, ...).

Le premier critère est l'erreur d'atteinte qui correspond à l'erreur en position entre la main et la cible à atteindre à la fin du mouvement. La distribution de cette erreur en fonction de la cible

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

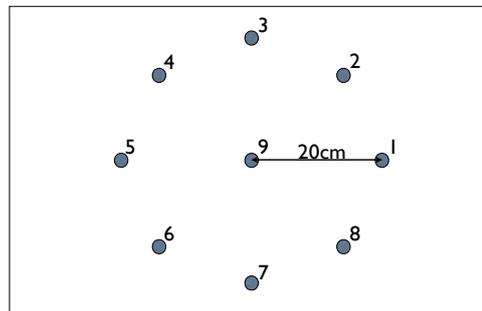


FIGURE 4.11 – Positions des différentes cibles à atteindre (de 1 à 8) et à fixer (de 1 à 9). Les cibles excentrées sont à une distance de 20cm de la cible centrale 9 qui est la position initiale de la main avant chaque geste d'atteinte.

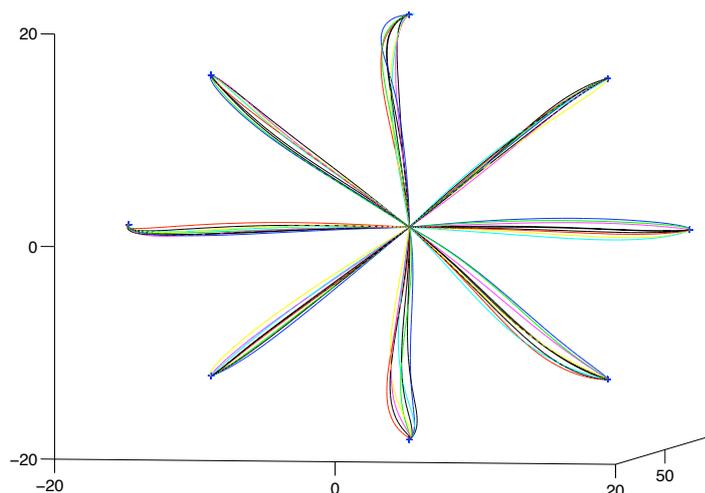


FIGURE 4.12 – Trajectoires de l'organe terminal produites lors de la simulation des 72 combinaisons possibles (8 cibles d'atteinte \times 9 cibles de fixation).

à atteindre est illustrée dans la figure 4.13. On y remarque que l'erreur maximale est inférieure à 2mm ce qui est clairement négligeable. Ce premier critère montre ainsi la qualité et la fiabilité de l'atteinte des différentes cibles.

Le deuxième critère concerne la forme des trajectoires. Nous pouvons observer sur la figure 4.12 que celles-ci sont quasi-rectilignes. La dynamique mise en place pour atteindre la cible est issue du modèle de [Hoff et Arbib 1993] présenté dans la section 4.3.6. Cette dynamique assure un déplacement entre deux points dans l'espace qui respecte le critère du minimum jerk (minimisation des variations de l'accélération). La trajectoire entre ces deux points obtenue est alors rectiligne. Une approche simple pour apprécier la linéarité des trajectoires est de calcu-

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

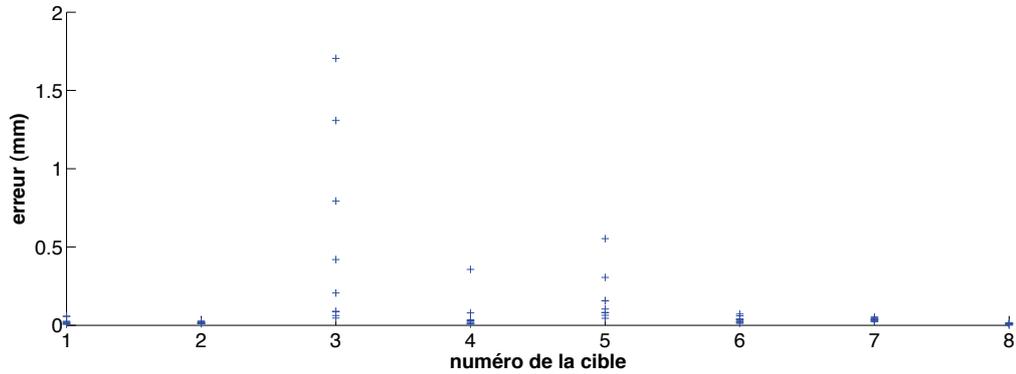


FIGURE 4.13 – Distribution de l’erreur en position entre l’organe terminal et la cible à atteindre à la fin du mouvement.

numéro de cible	moyenne (mm)	écart-type
1	99.95	0.04
2	99.97	0.02
3	99.93	0.04
4	99.97	0.02
5	99.95	0.03
6	99.96	0.02
7	99.96	0.03
8	99.95	0.04

TABLE 4.2 – Table récapitulative du pourcentage de variance expliquée par la direction principale des trajectoires.

ler le pourcentage de la variance expliquée le long de l’axe principal de ces trajectoires. Ce pourcentage se calcule à partir des valeurs propres de la matrice de covariance :

$$vars = eig(cov([xyz]))$$

$$explained = \frac{\max(vars)}{\sum(vars)},$$

où $cov([xyz])$ est la matrice de covariance sur l’ensemble des 50 coordonnées $[x, y, z]^T$ de l’organe terminal le long d’un geste d’atteinte. La fonction $eig()$ calcule les valeurs propres de la matrice de covariance. La variable “explained” traduit le pourcentage de variance expliquée le long de l’axe principal correspondant à la direction de la trajectoire. Le tableau 4.2 rapporte ce pourcentage moyen et l’écart-type correspondant pour chaque cible. Les trajectoires apparaissent quasi-rectilignes.

Le troisième critère porte sur l’évolution de la vitesse de l’organe terminal au cours de son déplacement. Le profil de vitesse est une autre conséquence de l’application du modèle de [Hoff

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

et Arbib 1993]. La minimisation des variations de l'accélération entraîne un profil en "cloche" de la vitesse de l'organe terminal lors de son déplacement. Ce profil théorique est présentée figure 4.14. Pour simplifier la lecture des 64 profils de vitesse, nous illustrons, pour chaque cibles d'atteinte, le profil moyen et l'écart-type correspondant sur la figure 4.15. Tous les profils de vitesse sont fortement identiques au profil théorique et nous présentons, sur la figure 4.16, l'écart de chacun des profils moyens par rapport au profil théorique. L'erreur en vitesse moyenne ne dépasse pas le millimètre par itération ce qui montre que ce RDNa ne perturbe pas la dynamique de contrôle du geste d'atteinte. On peut toutefois noter que la fin du mouvement vers la cible 3 est perturbée. Cette erreur est certainement due à un plus faible apprentissage pour cette configuration. On note que l'utilisation en boucle fermée du modèle de Hoff et Arbib pour la dynamique du geste d'atteinte permet de réduire cette erreur à l'itération suivante. Notre choix d'apprentissage supervisé engendrera de manière répétitive cette erreur pour cette configuration, même si elle est négligeable ici.

Ces trois premiers critères montrent la qualité et la fiabilité de notre RDNa pour effectuer le

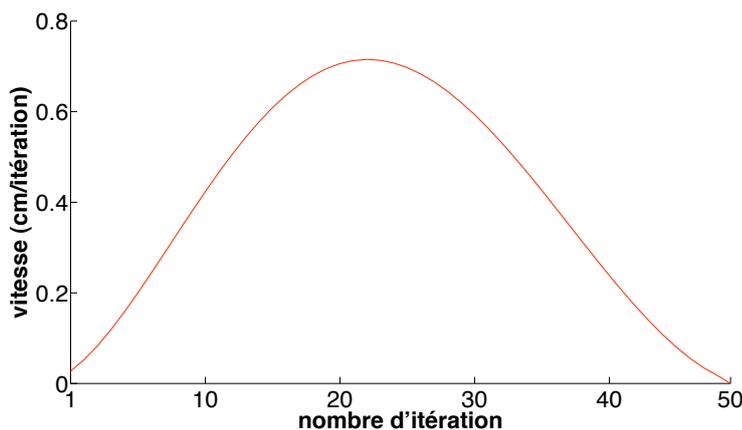


FIGURE 4.14 – Profil de vitesse théorique de l'organe terminal au cours d'un mouvement.

contrôle de gestes d'atteinte. Avant de regarder si l'activité des neurones de la couche cachée est modulée par l'orientation de la caméra, nous devons nous assurer que la forme des trajectoires ne dépend pas des conditions de perception visuelle. Pour cela nous avons réalisé trois tests statistiques visant à nous assurer que la forme des trajectoires ne dépend pas de l'orientation de la caméra, de la position de la cible et de l'excentricité de la position de la cible par rapport au point de fixation. Dans chaque cas, nous avons mesuré l'erreur entre les trajectoires obtenues à l'aide du RDNa et les trajectoires théoriques. Une analyse de variance à un facteur nous a permis de confirmer l'invariance des erreurs obtenues ($p < 0.05$). Nous pouvons donc en conclure que les formes des trajectoires ne sont pas corrélées avec la position de la cible à fixer ou à atteindre, ou encore à l'excentricité de la cible à atteindre par rapport à la cible à fixer. Ces résultats renforcent le fait que ce réseau de neurones artificiels exécute très bien son rôle. Nous

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

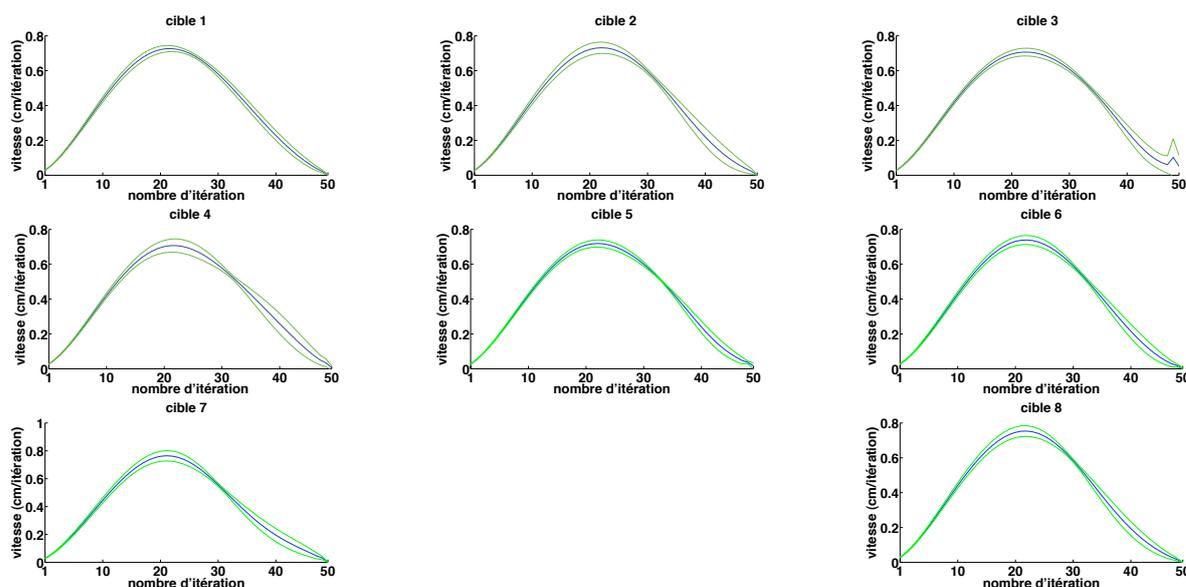


FIGURE 4.15 – Profil de vitesse pour chacune des huit cibles à atteindre (vitesse moyenne en bleue et écart-type en vert).

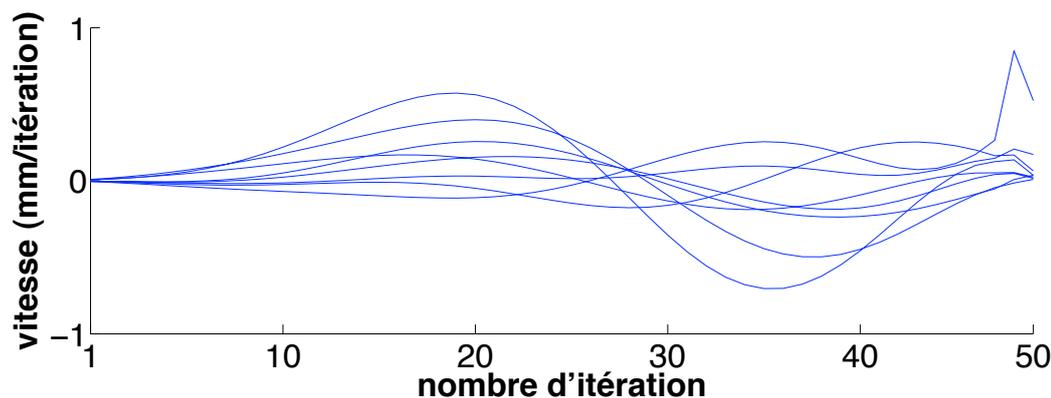


FIGURE 4.16 – Comparaison de chacun des profils de vitesse moyens par rapport au profil théorique.

pouvons désormais nous intéresser à l'activité interne de ce RDNa.

4.4.4.2 Modulation de l'activité interne du RDNa

Maintenant que nous avons montré que le RDNa remplit de manière fiable son rôle de contrôleur du bras, nous pouvons nous intéresser à l'activité interne de celui-ci. Comme dans les études électrophysiologiques, nous enregistrons l'activité des neurones sur l'ensemble des différents gestes d'atteinte. Nous moyennons puis normalisons cette dernière afin de représenter cette activité moyenne en fonction des positions des cibles à atteindre et à fixer. Nous obtenons

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

ainsi les 12 profils d'activités artificielles illustrés sur la figure 4.17.

Notre but est de rechercher un effet lié à l'orientation de la caméra sur ces différents profils.

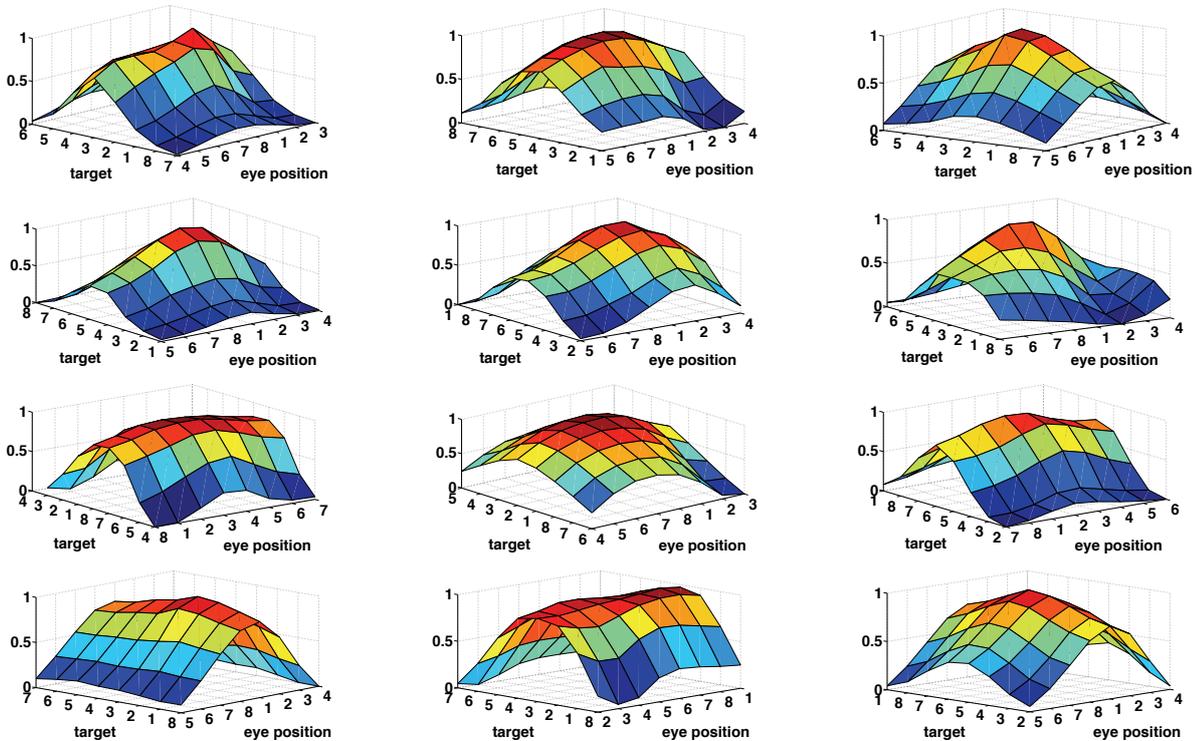


FIGURE 4.17 – Activité moyenne des 12 neurones artificiels présents dans la couche cachée en fonction de la position de la cible à atteindre et à fixer.

Nous devons donc les classifier. Pour cela, nous procédons en trois étapes. La première consiste à comparer ces différents profils entre eux afin de déterminer des groupes de profils similaires. Nous commençons par centrer les profils de manière à ce que le maximum d'activité soit au centre de chaque orientation (cible à atteindre et cible à fixer). Nous calculons ensuite la somme des distances entre deux profils, nous la normalisons et finalement nous la transformons de manière à obtenir un pourcentage de similitude. Les calculs de cette première étape sont les suivants :

$$distance = \sum(profil_a - profil_b)$$

$$percentsimilitude = 100\% - 100 \times \frac{distance}{max(distance)}$$

A partir de 80%, nous considérons que les profils sont similaires. Quatre groupes principaux sont obtenus et sont illustrés sur la figure 4.18. On peut noter que l'activité du neurone 2 du groupe 1 et le neurone 9 du groupe 3 présentent 79% de similitude. De plus, si les trois premiers groupes présentent des profils similaires, le quatrième groupe contient des profils qui ne montrent aucune similitude vis-à-vis des autres profils. La suite de notre procédure va nous permettre de comprendre cette première classification. En neurosciences, les profils de sélectivité à

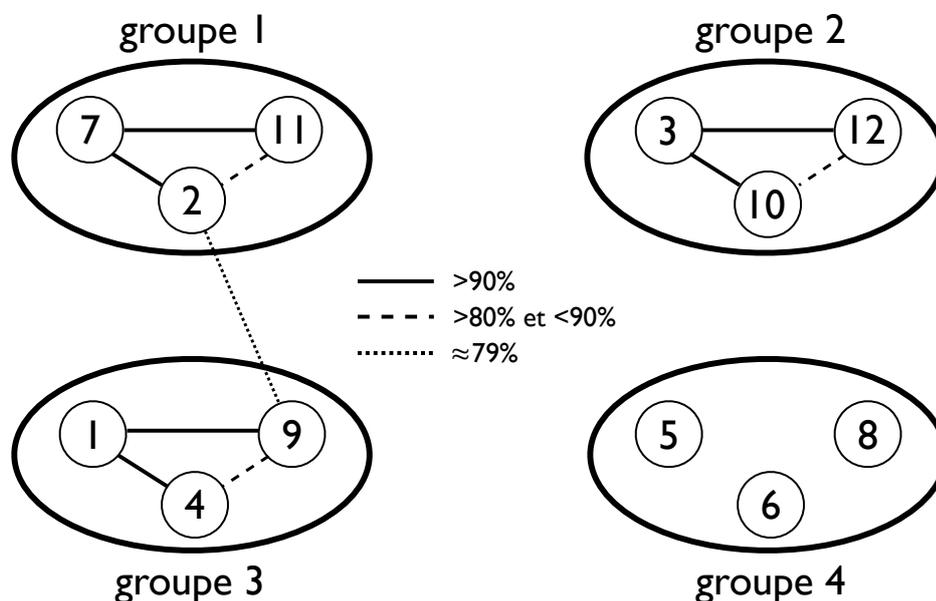


FIGURE 4.18 – Catégorisation des différents profils d'activité interne du RDNa. Les trois premiers groupes sont des ensembles de profils similaires et le dernier groupe est un ensemble de profils différents des autres. La liaison entre deux neurones révèle leur pourcentage de similitude (voir la légende au centre de la figure).

l'orientation du mouvement ou à l'orientation des yeux sont connus pour être en forme de cloche et sont très souvent approximés par une gaussienne. Dans notre cas, nous observons le niveau d'activité de neurones artificiels en fonction de l'orientation du mouvement mais également en fonction de l'orientation de la cible que fixe la caméra. D'un point de vue théorique, nous définissons trois profils illustrés sur la figure 4.19. Le premier n'est pas modifié par l'orientation de la caméra. Ainsi nous obtenons une courbe de gauss identique (moyenne et écart-type) pour chaque orientation de la caméra. Le deuxième profil est à l'inverse indépendant de l'orientation du mouvement, ainsi nous obtenons une courbe de gauss identique (moyenne et écart-type) pour chaque orientation du mouvement. Le troisième profil est une combinaison pondérée des deux profils précédents.

La deuxième étape consiste alors à comparer tous les profils enregistrés à ces trois profils théoriques. La moyenne de chaque courbe de gauss est centrée, soit sur l'orientation du mouvement pour le premier profil théorique, soit sur l'orientation de la caméra pour le deuxième profil, soit sur les deux pour le troisième profil. La méthode de comparaison se base sur la distance entre les profils. L'écart-type associé aux différentes gaussiennes joue alors un rôle prépondérant dans cette méthode. Nous recherchons donc les valeurs des différents écarts-types

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

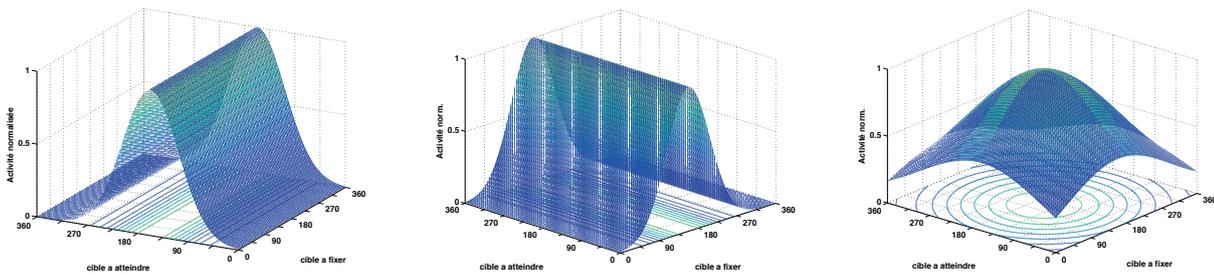


FIGURE 4.19 – Trois profils théoriques de l'activité des neurones artificiel : indépendance à l'orientation de la caméra, indépendance à l'orientation du mouvement ou combinaison des deux profils précédents

groupe	neurone	coeff. dir.	constante	% modulation
1	1	0.00	315	38
	4	0.06	347	57
	9	-0.07	99	25
3	2	0.12	335	31
	7	-0.02	115	16
4	11	-0.10	203	10
	5	-0.27	403	51
	6	0.35	320	42

TABLE 4.3 – Tableau récapitulatif de la régression linéaire et du pourcentage de modulation du maximum de l'activité.

sur les trois profils qui expliqueront soit un des trois premiers groupes définis précédemment soit un neurone artificiel du quatrième groupe au seuil de 80% de similitude.

En comparant avec le profil indépendant de l'orientation de la caméra, un écart-type de 1.1 permet d'expliquer le groupe 3 et un écart-type de 1.9 permet d'expliquer le groupe 1 avec une similitude supérieure à 90%. En comparant avec le profil indépendant de l'orientation du mouvement, un écart-type de 1.6 permet d'expliquer le groupe 2. Finalement, un écart-type de 3.4 sur une combinaison pondérée des deux premiers profils permet d'expliquer le profil du neurone 8 du groupe 4. On notera que les profils d'activité des neurones 5 et 6 sont plus similaires au profil d'indépendance à l'orientation de la caméra que d'indépendance à l'orientation du mouvement avec un pourcentage de similitude à 75%.

En résumé, les profils d'activité des neurones artificiels présents dans les groupes 1 et 3 et les neurones artificiels 5 et 6 du groupe 4 sont principalement représentés par le profil théorique indépendant de l'orientation des yeux. Pour confirmer ce résultat et évaluer l'existence d'un effet de la position du point de fixation, nous réalisons deux études : une régression linéaire sur l'activité crête de ces différents profils et un calcul du pourcentage de modulation le long de cette activité crête. Les résultats de ces deux études sont résumés dans le tableau 4.3. L'analyse par régression linéaire de l'activité crête des profils confirme les résultats issus de la comparai-

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

groupe	neurone	constante	% modulation
1	3	337.5	25
	10	339	21
	12	360	44

TABLE 4.4 – Tableau récapitulatif de la régression linéaire et du pourcentage de modulation du maximum de l'activité.

son avec le profil théorique indépendant de l'orientation de la caméra. En effet, les groupes 1 et 3 ont un coefficient directeur proche de zéro. Rappelons que la direction préférée du mouvement d'un neurone biologique a été définie comme la direction de la cible à atteindre pour laquelle l'activité du neurone est maximale. On en déduit que pour nos neurones artificiels des groupes 1 et 3, les directions préférées du mouvement sont égales aux constantes issues de la régression linéaire. Cette même analyse confirme également que les profils des neurones artificiels 5 et 6 du groupe 4 sont principalement orientés comme le profil théorique indépendant de l'orientation de la caméra. En effet, les coefficients directeurs ne sont plus négligeables mais sont inférieurs à 1. La direction préférée du mouvement de chacun de ces neurones varie donc légèrement en fonction de l'orientation de la caméra.

Bien que les neurones artificiels des groupes 1 et 3 aient une direction préférée du mouvement constante, l'analyse du pourcentage de modulation le long de cette direction nous permet d'évaluer la possibilité d'un effet de l'orientation de la caméra. Les différents pourcentages sont résumés dans le tableau 4.3. Si l'on fait l'hypothèse qu'un pourcentage inférieur à 20% est tolérable, nous concluons que les 2 neurones artificiels 7 et 11 du groupe 3 sont indépendants de l'orientation de la caméra. En revanche, l'activité des neurones artificiels du groupe 1 et les neurones artificiels 2, 5 et 6 est modulée par l'orientation de la caméra (de 25 à 57%).

La comparaison au profil théorique indépendant de l'orientation du mouvement permet d'expliquer le groupe 2. L'analyse par régression linéaire de l'activité crête de ces profils confirme que ces derniers montrent une orientation préférée de la caméra constante. L'analyse montre que pour les trois neurones du groupe 2, le pourcentage de modulation de l'activité crête est supérieur à notre seuil de tolérance. Ainsi nous considérons que l'activité de ces neurones (3, 10 et 12) est modulée par l'orientation de la cible. Le tableau 4.4 récapitule ces résultats. Enfin, l'analyse des différents profils des neurones artificiels nous indique que seul le profil du neurone artificiel 8 est similaire au profil théorique combiné. Cette comparaison nous permet d'avancer que l'activité de ce neurone artificiel est dépendante de l'orientation de la caméra.

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

4.4.5 Comparaison de l'activité des neurones artificiels et des neurones biologiques

Nous venons d'étudier les différents profils d'activité des neurones artificiels issus de la simulation de notre RDNa. Nous proposons maintenant de les comparer aux trois profils d'activités des neurones biologiques enregistrés au sein de l'aire prémotrice dorsale PMd et présentés dans la section 4.2.2. Le premier profil biologique révèle une activité indépendante à la direction du regard et indique une direction préférée du mouvement constante. Parmi nos 12 profils de neurones artificiels, ceux des neurones 7 et 11 montrent les mêmes caractéristiques. Le deuxième profil biologique illustre une activité modulée par la direction du regard mais a toujours une direction préférée du mouvement constante. Notre analyse nous permet d'identifier 5 neurones artificiels dont les profils d'activité sont identiques à ce deuxième profil (neurones 1, 2, 4, 8 et 9). Enfin concernant le troisième profil biologique, la direction du regard module l'activité neuronale et la direction préférée du mouvement. L'analyse de nos profils artificiels montre que les neurones des groupes 2 et 4 (neurones 3, 10, 12, 5 et 6) présentent ces mêmes caractéristiques. Cependant, on peut en différencier deux catégories. La première regroupe les neurones 5 et 6, où la combinaison linéaire entre l'orientation de la caméra et du mouvement est faible. La direction préférée de ces neurones varie dans un intervalle défini. La seconde ne présente une direction préférée du mouvement que pour une certaine orientation de la caméra.

4.5 Discussion

L'orientation des yeux module l'activité neuronale d'un très grand nombre d'aires impliquées dans les traitements de notre perception visuelle et auditive principalement. Ces traitements convergent majoritairement vers le cortex pariétal avant de se projeter vers le cortex moteur comprenant les aires prémotrices (PMd et PMv), l'aire motrice primaire (M1) et l'aire motrice supplémentaire (SMA). Les résultats de l'étude électrophysiologique de [Jouffrais et al. 2000] montrent qu'il existe une modulation de l'activité des neurones de l'aire prémotrice dorsale liée à la direction du regard. Comment pouvons-nous interpréter cette modulation ? Sagit-il encore d'une transformation de coordonnées ? Dans ce chapitre, nous avons apporté des éléments computationnels supportant l'idée que cet effet de l'orientation des yeux et de la tête est dû à la planification d'un mouvement initialement exprimé dans un référentiel oculo-centré.

L'étude de [Jouffrais et al. 2000] s'est intéressée à l'effet de la direction du regard lors de l'exécution de gestes d'atteinte visuellement guidés. A partir de ces indices visuels, plusieurs études neuroscientifiques montrent que la position de la main et de la cible à atteindre sont codées dans une même région du cortex pariétal nommée l'aire PRR (Parietal Reach Region). Les propriétés de cette aire laissant suggérer que le SNC utilise ces deux positions

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

pour définir un “vecteur de différence”. Ce dernier serait à la base de la planification et de l'exécution du mouvement. Plusieurs équipes de recherche se sont intéressées à son codage ou au(x) référentiel(s) utilisé(s) pour coder les positions de la main et de la cible à atteindre. Bien que l'activité de certaines cellules semble se référer à un référentiel corps-centré, cranio-centré, oculocentré et/ou intermédiaire (combinaisons entre ces référentiels), un grand nombre de résultats expérimentaux indique que le SNC utilise principalement un référentiel visuel pour coder ce vecteur de différence main-cible dans l'aire PRR. Cette observation est à la base des hypothèses de notre étude où l'on considère qu'un geste d'atteinte est initialement codé par un vecteur de différence exprimé dans le référentiel oculocentré. L'aire PRR est un recouvrement des aires V6A et MIP qui projettent anatomiquement sur l'aire prémotrice dorsale (PMd). Dans le cortex moteur, l'aire motrice primaire est considérée comme une aire impliquée dans la dynamique du mouvement et les aires prémotrices étaient supposées être impliquées dans le calcul des plans moteurs et processus sensorimoteurs. Toutes les aires du cortex moteur sont fortement interconnectées.

Pour comprendre les transformations et les variables nécessaires à la planification de gestes d'atteinte, nous avons utilisé un formalisme issu de la robotique. Ce dernier offre un cadre théorique pour exprimer les transformations nécessaires à la synthèse d'une loi de commande. Par la mise en place d'un modèle général puis simplifié, nous montrons que si un geste d'atteinte est défini par un vecteur de différence main-cible exprimé dans un référentiel visuel, le contrôleur d'atteinte présente une dépendance à toutes les articulations présentes le long de la chaîne cinématique reliant la caméra à l'organe terminal (la main). Nous en concluons que l'effet de la position des yeux observé par [Jouffrais et al. 2000] dans PMd peut être une conséquence de cette dépendance.

Si le formalisme de la robotique nous permet d'identifier les paramètres nécessaires à la synthèse de la commande, il ne nous permet pas directement d'expliquer les différents types de modulation de l'activité neuronale enregistrée lors de l'étude électrophysiologique. Pour cela, nous avons mis en œuvre un réseau de neurones artificiels classiquement utilisé par les modélisateurs de processus sensorimoteurs en neurosciences. Ce type de réseau de neurones artificiels a permis d'interpréter des enregistrements électrophysiologique présentant un codage de l'activité neuronale dans des référentiels intermédiaires. Entraîné à partir de notre modèle robotique, nous avons développé un réseau de neurones artificiels qui code le contrôleur du geste d'atteinte et dont les neurones présentent les mêmes caractéristiques que les profils d'activité rapportés par [Jouffrais et al. 2000].

Notre étude conduit à une discussion plus générale à propos du rôle de PMd dans le contrôle moteur chez le primate. Pendant longtemps l'aire motrice primaire M1 était considérée comme la seule aire corticale impliquée dans le contrôle du mouvement. Les aires prémotrices sont supposées être impliquées dans le calcul des plans moteurs et de processus sensorimoteurs. Des évidences anatomiques montrent que, en plus de M1, des projections directes corticospinales

4. EFFET DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS PMD

ont des origines d'aires prémotrices multiples. D'autre part, beaucoup d'auteurs rapportent une forte communication entre PMd et M1 [Xiao et al. 2006]. Comme PMd est fortement connecté avec M1, les autres aires prémotrices et le cortex pariétal postérieur [Cisek et Kalaska 2002], [Pesaran et al. 2006], cette aire semble jouer un rôle important dans la représentation des modèles internes de la cinématique et la synthèse de la commande.

Au lieu de considérer que le rôle de PMd est de calculer le vecteur de différence et de l'exprimer en fonction du corps, comme le proposent [Blohm et al. 2009], nous suggérons que les neurones de cette aire sont impliqués dans le calcul de la commande au niveau cinématique. En accord avec cette idée les neurones du cortex prémoteur coderaient le lien différentiel qui permet de déterminer une variation instantanée des articulations pour conduire la main dans la direction du vecteur de différence comme l'ont déjà suggéré [Shadmehr et Wise 2005]. Cependant la différence importante entre le modèle que nous proposons et de celui de Shadmehr et Wise, est que si le vecteur de différence est exprimé dans des coordonnées visuelles, alors l'activité des neurones ne doit pas seulement être modulée par la variation des articulations du bras mais aussi par celle de la position des yeux dans l'orbite [Boussaoud et Bremmer 1999], [Jouffrais et Boussaoud 1999], [Cisek et Kalaska 2002] et la position de la tête par rapport au tronc [Batista et al. 2007]. L'approche robotique, et en particulier le formalisme de l'asservissement visuel, fournit un espace de travail mathématique clair pour modéliser les transformations inhérentes au calcul du contrôleur du geste d'atteinte et montre cette dépendance.

4.6 Conclusion

Si la planification d'un geste d'atteinte visuellement guidé est exprimée dans un référentiel oculocentré comme un grand nombre de travaux en neurosciences tendent à le montrer, alors nous affirmons grâce aux formalismes issus de la robotique que toutes les articulations de la chaîne cinématique entre l'œil et la main doivent être pris en compte pour commander ce type de mouvement. En conséquence il apparaît normal que l'activité des neurones dans la région corticale dédiée à la planification cinématique du mouvement soit modulée par l'orientation des yeux/tête et même de la tête/corps. Notre étude apporte de nouveaux éléments pour interpréter le rôle fonctionnel du cortex prémoteur dorsal (PMd). L'implantation de la loi de commande du bras sur un réseau de neurones artificiels supervisé nous permet de faire un lien direct avec des enregistrements déjà publiés en neurosciences. Les activités de neurones artificiels de notre réseau présentent les mêmes caractéristiques que les neurones biologiques. Ainsi, nous interprétons que l'effet de position des yeux/tête et de la tête/corps ne jouent pas un rôle uniquement réservé aux transformations de coordonnées mais sont également des paramètres intrinsèques à la loi de commande de gestes d'atteinte visuellement guidés.

5

De la perception à l'action : bilan de l'activité corticale et proposition d'un invariant géométrique pour l'intégration multisensorielle

A partir des résultats en neurosciences et des formalismes de la robotique, nous nous sommes intéressés dans cette thèse à deux paramètres somatiques que sont l'orientation des yeux/tête et l'orientation de la tête/corps. Ces deux paramètres sont fortement impliqués dans les transformations de coordonnées [Pouget et al. 2002]. Notre première étude, présentée au chapitre 3, suggère que l'orientation de la tête/corps module l'activité des neurones de l'aire V1 située au début du traitement visuel. Notre seconde étude suggère une nouvelle interprétation de la modulation neuronale due à l'orientation des yeux/tête au sein du cortex prémoteur dorsal (PMd). Basée sur ces deux études, nous présentons dans un premier temps nos différentes hypothèses sur le rôle fonctionnel de ces deux paramètres. Puis, dans un second temps, nous présenterons notre théorie sur la représentation de l'espace et sa construction impliquant plusieurs modalités sensorielles.

5. DE LA PERCEPTION À L'ACTION

5.1 Rôle fonctionnel des signaux d'orientation des yeux/tête et de la tête/corps

Avant de présenter nos différentes hypothèses, nous proposons dans la section suivante un récapitulatif des principales aires impliquées dans la boucle sensorimotrice lors d'exécution de gestes d'atteinte visuellement guidés et d'orientations du regard. Ce récapitulatif nous permet de relier non seulement nos deux études mais également permet d'illustrer la présence distribuée des signaux d'orientation des yeux/tête, de la tête/corps et de la tête/gravité.

5.1.1 De la perception à l'action : bilan des aires où ces signaux modulent l'activité

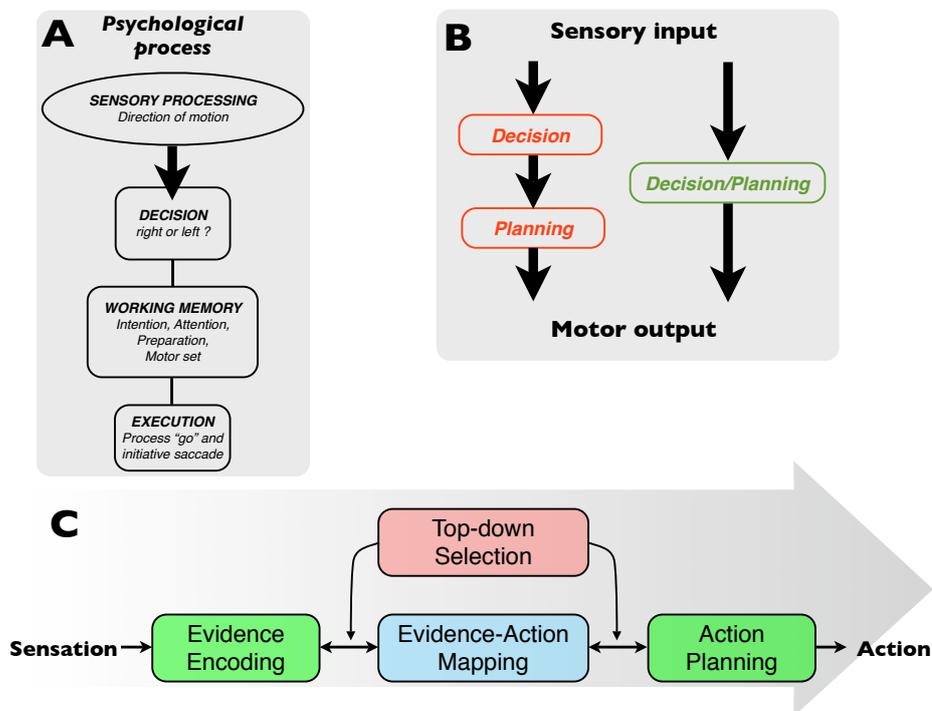


FIGURE 5.1 – Illustration de trois modèles sensorimoteurs liant la perception, décision et action. La figure A, extraite de [Shadlen et Newsome 2001], illustre la succession des étapes minimales nécessaires à la discrimination de la direction du mouvement. La figure B, extraite de [Andersen et Cui 2009], illustre à droite un traditionnel modèle sensorimoteur dans lequel prise de décision et planification sont séparées et à gauche, un modèle récent dans lequel les processus sont simultanément représentés dans plusieurs aires du lobe pariétal et frontal. La figure C, extraite de [Siegel et al. 2011], illustre au sein de la boucle sensorimotrice des signaux participant à la prise de décision perceptive de types “top-down”.

Réaliser un mouvement volontaire nécessite plusieurs étapes de traitement. Dans l'étude

de [Shadlen et Newsome 2001], les auteurs définissent quatre étapes : processus sensoriel, décision, mémoire de travail et exécution. La représentation de ces quatre étapes est reportée ici dans la figure 5.1-A. Le terme décision était spécifique à la direction perçue du mouvement. Dans ce type d'étude, il est généralement demandé à l'animal ou au sujet d'indiquer le choix perceptuel par un mouvement des yeux. C'est au sein de l'aire latérale du sillon intrapariétal (LIP) qu'à partir du choix perceptuel, il y a une prise de décision pour le mouvement des yeux [Shadlen et Newsome 1996]. Il existe plusieurs types de décision qui concernent le où, quand et comment, [Haggard 2008] pour revue. La prise de décision et la planification du mouvement ne sont plus considérées comme un processus sériel mais simultané (voir figure 5.1-B tirée de la revue de [Andersen et Cui 2009]). Dernièrement, un modèle est proposé par [Siegel et al. 2011] pour mettre en évidence des signaux de type top-down dans la prise de décision au cours de la boucle sensorimotrice (voir figure 5.1-C). Basé sur ces trois modèles, nous proposons une nouvelle représentation des étapes nécessaires pour réaliser un mouvement volontaire où nous considérons trois "modules" : perception, décision et action. Cette nouvelle représentation rejoint la définition d'un robot que nous avons présentée au chapitre 2. Dans le module décision nous regroupons les trois types où, quand et comment de [Haggard 2008] avec l'intention, l'attention et la mémoire liée à la tâche de [Shadlen et Newsome 2001]. Ces trois modules sont illustrés dans la figure 5.2. En neurosciences, ces trois modules ne sont pas clairement séparés

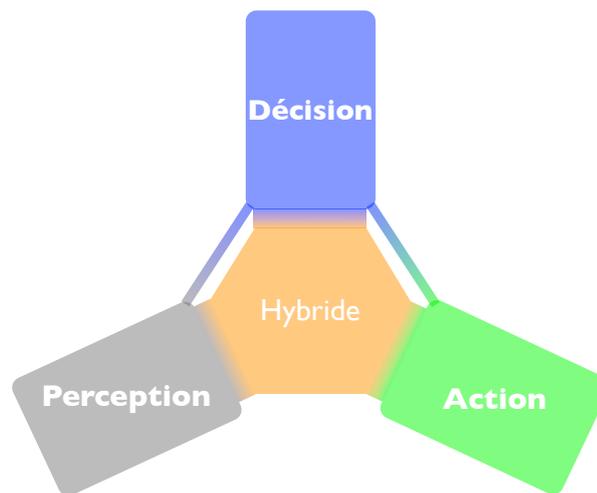


FIGURE 5.2 – Modules liés à la boucle sensorimotrice impliquée pour des gestes volontaires chez le singe. La zone hybride recouvre un rôle fonctionnel perceptif, décisionnel et moteur. Des connexions de type top-down sont représentées en accord avec les modèles présentés dans la figure 5.1.

d'un point de vue anatomique comme le montre les derniers modèles (voir figures 5.1-B et 5.1-C). Une zone de notre cerveau se situe à l'intersection de ces trois modules que l'on nomme ici : "hybride" (voir fig. 5.2). Elle regroupe un ensemble d'aires où le rôle fonctionnel est à la fois lié à la perception, décision et action [Gottlieb 2007]. Le module décision reflète l'aspect

5. DE LA PERCEPTION À L'ACTION

volontaire du mouvement. Il n'intervient pas dans les mouvements de type réflexe que nous n'étudions pas dans le cadre de cette thèse. Nous ne nous sommes pas non plus intéressés directement au module décision dans nos études. Bien que nous l'évoquions, nous en parlerons de manière très superficielle. La commande d'un geste d'atteinte visuellement guidé dépend de la perception que l'on a de sa main, de la cible à atteindre, de ce qui compose notre environnement, mais dépend surtout du référentiel dans lequel notre perception est exprimée (voir chapitre 4). Notre première étude, réalisée dans l'aire visuelle primaire, se positionne dans le module perception et la seconde dans le module action. Dans le cadre d'un geste d'atteinte visuellement guidé, deux tâches sont à réaliser : 1 - la première est l'exploration de notre environnement pour que la cible soit visible ; 2 - La seconde est le déplacement de la main pour atteindre la cible. Nous proposons une schématisation des principales aires impliquées dans ces deux tâches chez le singe avec un nombre de connexions anatomiques suffisamment conséquents pour illustrer la complexité de ces réseaux sensorimoteurs. D'un point de vue des projections anatomiques, notre schématisation est loin d'être exhaustive. La figure 5.3 présente cette schématisation avec laquelle on peut faire le lien avec notre représentation des étapes nécessaires illustrée figure 5.2.

– Références liées à la figure 5.3

1 - Les signaux d'orientation des yeux/tête modulent l'activité neuronale dans V1 : [Trotter et Celebrini 1999], V2 : [Rosenbluth et Allman 2002], V3A : [Galletti et Battaglini 1989], V4 : [Bremmer 2000], V5/MT : [Squ], V6 [Galletti et al. 1993], V6A : [Marzocchi et al. 2008], MST : [Bremmer et al. 1997], LIP : [Andersen et al. 1990], 7a : [Bremmer et al. 1997], VIP : [Duhamel et al. 1997], MIP : [Mulette-Gillman et al. 2005], PMd : [Boussaoud 1995], PMv : [Boussaoud et Wise 1993], 3a : [Wang et al. 2007], FEF : [Russo et Bruce 1993], SEF : [Schlag et al. 1992] et CS : [Van Opstal et al. 1995].

2 - Les signaux d'orientation de la tête/corps modulent l'activité neuronale dans V1 : notre propre étude présentée au chapitre 3, LIP : [Snyder et al. 1998], 7a : [Brotchie et al. 1995], CS : [Nagy et Corneil 2010], FEF : [Fasold et al. 2008]. On notera que notre étude de modélisation présentée au chapitre 4 est en accord avec l'hypothèse que les neurones de l'aire prémotrice dorsale doivent également être modulés par l'orientation de la tête/corps [Batista et al. 2007] mais reste à le prouver.

3 - Les signaux vestibulaires modulent l'activité neuronale dans V1 [Sauvan et Peterhans 1999], MST [Duffy 1998], MIP [Klam et Graf 2006], VIP [Bremmer et al. 2002], PIVC [Grüsser et al. 1990], 3a [Guldin et al. 1992], 2v [D.W. et Fredrickson 1971] et FEF [Fukushima et al. 2004].

4 - Les connexions anatomiques sont un bilan non exhaustif de [Maunsell et van Essen 1983], [Fries 1984], [Felleman et Van Essen 1991], [Guldin et al. 1992], [Gattas et al. 1997], [Luppino et al. 1999] ; [Lewis et Van Essen 2000], [Clavagnier et al. 2004], [Xiao et al. 2006], [Borra et al. 2008], [Falchier et al. 2010], [Passarelli et al. 2011], [Prevosto

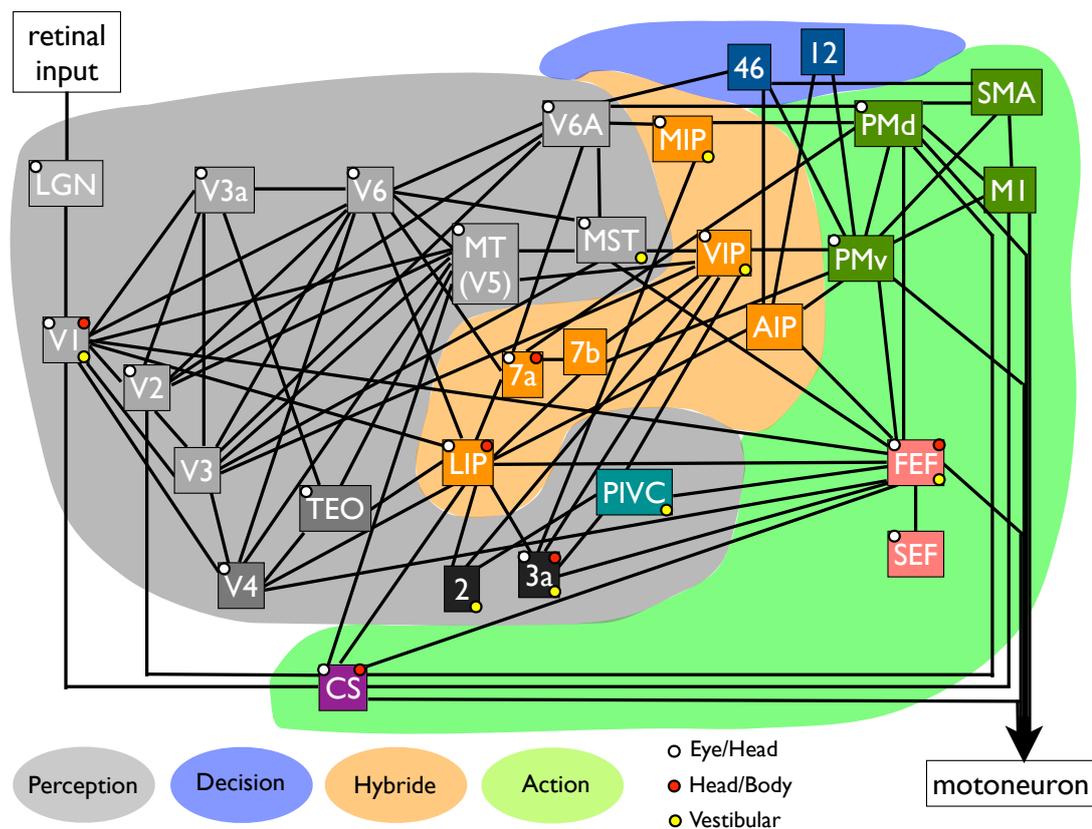


FIGURE 5.3 – Réseaux neuronaux impliqués dans la commande du regard et de gestes d'atteinte visuellement guidés. On retrouve les trois modules : i - la perception en gris. ii - la décision en violet. iii - l'action en vert. La zone orange regroupe les aires qui sont impliquées dans ces trois modules. Les signaux d'orientation des yeux/tête (Eye/Head), d'orientation de la tête/corps (Head/Body) et du système vestibulaire (Vestibular) à l'origine de modulation d'activité neuronale des aires présentées ici sont indiqués par un cercle blanc, rouge et jaune, respectivement (voir texte pour les références). Les différentes aires participant à la perception visuelles sont l'aire visuelle primaire ou striée [V1] et les aires visuelles extrastriées [V2, V3, V3a, V4, V5/MT, V6 et V6a]. On distingue la voie ventrale (aires encadrées en gris foncé) de la voie dorsale (aires encadrées en gris clair). Les aires liées à la perception proprioceptive sont les aires [2v] et [3a]. L'aire liée à la perception de déplacement de la tête/gravité est l'aire vestibulaire pariéto-insulaire [PIVC]. Les différentes aires où se chevauchent des rôles fonctionnels liés à la perception, décision et action sont les aires intrapariétales ventrale [VIP], médiale [MIP], latérale [LIP], antérieure [AIP] et les aires [7a] et [7b] qui sont latérales au sillon intrapariétale (7a est caudale à 7b). Les aires impliquées dans la décision sont l'aire préfrontale motrice [46] et la zone frontale oculaire [12]. Les aires liées à l'action du geste de la main où l'on trouve les aires prémotrices ventrale [PMv] et dorsale [PMd], l'aire motrice supplémentaire [SMA] et l'aire motrice primaire [M1]. Finalement, les aires liées à la direction du mouvement du regard sont le colliculus supérieur [CS], le champ oculaire frontal [FEF] et le champ oculaire supplémentaire [SEF].

et al. 2011].

5. DE LA PERCEPTION À L'ACTION

- **Description des différentes phases du traitement :** La figure 5.3 montre les principales aires impliquées dans les trois principaux modules que sont la perception, la décision et l'action. On y trouve également une zone hybride où perception, décision et action se superposent. Il est important de noter que les trois modules et donc les aires correspondantes ne sont pas strictement dédiées à la perception, décision et action. La figure 5.2 l'illustre par ces connexions entre perception-décision et décision-action.

Le module perception se compose d'informations visuelles, proprioceptives et vestibulaires. Les informations visuelles sont traitées selon une voie dite "dorsale" (en gris clair dans la fig. 5.3) et une seconde dite "ventrale" (en gris foncé dans la fig. 5.3). La voie dorsale traite la localisation dans l'environnement et la voie ventrale traite la reconnaissance des formes et objets. Les aires présentes dans ces deux voies communiquent bien que leurs rôles respectifs soient différents. A partir de ce traitement visuel, on distingue plusieurs voies de traitement impliquées dans le geste d'atteinte ou dans l'orientation du regard :

1 - *V6A-MIP-PMd-M1* [Galletti et al. 2003] : La première étape de cette voie est le codage de la position initiale de la main et sa position finale (position de la cible à atteindre) traité au sein de V6A et MIP [Rossetti et al. 1995], [Ghez et al. 1997], [Vindras et Viviani 1998], [Ulloa et Bullock 2003], [Beurze et al. 2006], [Chang et al. 2009], [Beurze et al. 2010], [Blangero et al. 2010]. On peut noter que MIP prend en compte des informations de rotation de la tête/gravité [Klam et Graf 2006] mais aussi des informations somesthésiques [Prevosto et al. 2011]. Le codage de la cible à atteindre montre qu'un rôle décisionnel est mis en place [Scherberger et Andersen 2007]. L'aire 46 qui joue entre autre un rôle dans l'attention [Ichihara-Takeda et Funahashi 2007], [Watanabe et Funahashi 2007] projette sur l'aire V6A [Passarelli et al. 2011]. Des neurones de l'aire 46 présentent une modulation lors de stimulations visuelles et de mouvements saccadiques des yeux [Funahashi et al. 1991], [Baker et al. 2006]. Ces mêmes propriétés ont été observées dans V6A [Galletti et al. 1996] et [Kutz et al. 2003]. Finalement, V6A qui est suggérée jouer un rôle dans la coordination du regard et de l'attention vers des objets pour les atteindre et les saisir [Galletti et al. 2003] doit être supervisée par l'aire 46. L'aire MIP et une partie de l'aire V6A ont été définies comme la région du cortex pariétal spécialisée dans le geste d'atteinte nommée PRR (Parietal Reach Region) [Batista et al. 1999]. Rappelons que c'est dans cette région (PRR) qu'est définie le vecteur de différence dans notre étude présenté au chapitre 4 qui est considéré comme la consigne du mouvement [Shadmehr et Wise 2005]. A partir de cette consigne, la commande cinématique est calculée au sein de l'aire prémotrice dorsale (PMd) et la commande dynamique au sein du cortex primaire M1 [Shadmehr et Wise 2005]. Cette commande dynamique est ensuite projetée sur le tronc cérébral dont le colliculus supérieur (CS) fait partie et, sur les motoneurones par la voie corticospinale qui innervent les muscles.

2 - *MT-MST-VIP-PMv-MI* [Galletti et al. 2003] : Les aires MT, MST, VIP codent la direction du mouvement visuel de manière hiérarchique [Lewis et Van Essen 2000] et projettent sur l'aire prémotrice ventrale (PMv) [Luppino et al. 1999]. Pour une commande cinématique de gestes d'atteinte visuellement guidés lors d'expériences statiques comme nous l'avons étudié au chapitre 4, cette voie est très peu active comparée à la voie précédemment écrite. Elle prend en revanche tout son sens dans la vie de tous les jours où la prise en compte de notre propre mouvement par rapport à l'environnement est importante. On notera que les neurones de l'aire MT ne sont pas modulés par des signaux vestibulaires [Chowdhury et al. 2009] contrairement aux neurones des aires MST et VIP [Chen et al. 2011]. Ce codage de la gravité est également présent au sein du cortex somesthésique (aires 2 et 3a) et du cortex vestibulaire pariéto-insulaire (PIVC). On retiendra de cette voie qu'elle prend tout son sens dans la vie de tous les jours où la prise en compte de notre propre mouvement par rapport à l'environnement est importante.

3 - (*LIP-7a-7b-AIP-12-46-SEF*)-(FEF-CS) Le champ oculaire frontal (FEF) est plus impliqué dans la génération de commande motrice pour la poursuite oculaire [Fukushima et al. 2011]. Les aires impliquées en amont sont multiples (LIP, 7a, 7b, 12, AIP et SEF). Les aires LIP et 7a sont connues pour être actives avant et pendant des saccades oculaires [Snyder et al. 1997]. Les mêmes auteurs montrent qu'elles présentent également un codage de l'intention d'exécuter une saccade. Les neurones des aires 7a et 7b sont activées conjointement avec les aires MT, MST, FEF et SEF après un mouvement de la tête ou des yeux pour élaborer une poursuite oculaire. Les neurones de l'aire 12 et de l'aire AIP contribuent à la mémoire des indices visuels [Murata et al. 1996]. Le champ oculaire supplémentaire (SEF) contient différents signaux codant la mémorisation de direction de mouvements visuels, la décision d'une poursuite oculaire ou à la préparation de la saccade [Shichinohe et al. 2009]. Finalement le colliculus supérieur (CS) qui est une aire sous corticale présente dans le tronc cérébral. Une stimulation du colliculus supérieur peut engendrer des mouvements des yeux et de la tête [Freedman et al. 1996]. Le colliculus participe également à l'une des voies motrices descendantes du système ventromédian qui est le faisceau tectospinal. Ce faisceau participe au contrôle des mouvements contralatéraux de la tête en réponse à un stimulus visuel, auditif ou somatique. Le colliculus supérieur (CS) et le champ oculaire frontal (FEF) sont connectés anatomiquement [Fries 1984] et jouent tous les deux un rôle dans la commande de notre regard (œil + tête).

5.1.2 Les paramètres présents lors de la perception multisensorielle

De nombreux travaux se sont penchés sur les mécanismes neuronaux de codage de l'information spatiale dans le cerveau par le biais des transformations sensori-motrices. Le codage

5. DE LA PERCEPTION À L'ACTION

de l'information référencée à l'œil dominant (oculocentrée) modulée par la position des yeux sous forme de champs de gain (gain fields) s'est révélé être un mode de fonctionnement neuronal commun à quasi tout le cerveau dans la voie dorsale et la voie ventrale. Il a été proposé qu'il participerait à un calcul neuronal de transformations de coordonnées (voir [Andersen et al. 1985] [Snyder 2000] [Salinas et Thier 2000] [Salinas et Abbott 2001] [Pouget et al. 2002]). Nous avons étendu l'existence de ces champs de gains dans l'aire V1 à ceux induits par le signal de position de la tête/corps comme il a été montré précédemment dans le cortex pariétal [Brotchie et al. 1995] en accord avec les données d'imagerie [Petit et Beauchamp 2003] et [Brotchie et al. 2003]. La présence de ces modulations neuronales initiées par des signaux de position des yeux/tête, de la tête/corps, voire de la tête/gravité présente également dans V1 [Sauvan et Peterhans 1999], conduit à s'interroger sur la présence de ces signaux à un stade précoce du traitement de l'information visuelle.

Nous posons deux hypothèses tant qu'à leur rôle fonctionnel.

- **Hypothèse 1 :** Ces signaux vont permettre d'établir une exploration de l'environnement. Les neurones de l'aire V1 codent la direction et le moment de la prochaine saccade [Super 2006]. Toutes les aires qui sont considérées impliquées dans les mouvements saccadiques (LIP, 7a, FEF, CS) sont modulées non seulement par l'orientation des yeux/tête mais également par l'orientation de la tête/corps. On peut donc s'attendre à ce que ce ne soit pas uniquement les saccades oculaires que ces aires vont commander mais la direction du regard (yeux + tête / corps). De plus, l'aire 7a est modulée par l'orientation du corps/environnement [Snyder et al. 1998]. Il est donc possible que la commande du regard puisse s'étendre à l'orientation du corps/environnement. Ce qui serait en accord avec le fait qu'une saccade entraîne une rotation de la tête qui peut également entraîner une rotation du corps/environnement [McCluskey et Cullen 2007]. L'aire V1 projette directement sur le CS qui à son tour commande des directions du regard [Freedman et al. 1996]. Notre première hypothèse est donc que les signaux d'orientations de la tête/corps viennent s'ajouter à ceux d'orientation des yeux/tête dans le but d'établir la commande du regard liée à une intention ou à une attention.
- **Hypothèse 2 :** Ces signaux vont permettre une représentation unifiée de l'espace. Cette hypothèse sera reprise dans notre théorie sur la représentation de l'espace mais de manière succincte, on peut considérer que les deux signaux proprioceptifs de l'orientation des yeux/tête et de la tête/corps interviennent dans la transformation de coordonnées afin de fusionner les données issues de différents capteurs. Par exemple, l'audition et la vision sont codées dans un référentiel craniocentré et oculocentré respectivement. L'aire auditive primaire est modulée par l'orientation des yeux/tête et V1 également. On peut alors imaginer que la transformation de coordonnées peut aller dans les deux sens et permettre une fusion réciproque. La position de la tête/corps peut alors être interprétée comme une mise en commun de données corps-centré comme peuvent l'être les informations so-

mesthésiques. Si l'audition fusionne avec la vision, alors on peut très bien s'imaginer qu'une reconstruction proprioceptive peut se mettre en place au niveau des neurones de l'aire V1.

5.1.3 Les paramètres nécessaires à la commande de gestes visuellement guidés

Notre schématisation et notre étude présentée au chapitre 4 met clairement en évidence le besoin de mettre en correspondance des signaux somesthésiques, proprioceptifs, vestibulaires et visuels. Les propriétés fonctionnelles des aires V6A et MIP qui forment PRR (région spécialisée dans le geste d'atteinte [Batista et al. 1999]) montrent que le vecteur de différence y est calculé laissant ainsi toutes possibilités aux aires prémotrices dorsales et ventrales d'établir la commande cinématique et non comme le suggèrent certains auteurs la transformation de coordonnées. Le rôle fonctionnel dans le module action serait alors purement lié à la commande en elle-même. C'est donc un rôle différent de ceux que l'on peut émettre lors de la phase de perception.

5.2 Quel invariant géométrique pour la représentation multisensorielle et le contrôle du mouvement ?

Un très grand nombre d'études ont tenté d'identifier les stratégies mises en place par le système nerveux central (SNC) pour construire une représentation du corps et de l'environnement. Ces deux représentations semblent nécessaires pour la commande du mouvement. Au début de cette thèse nous nous sommes posés les questions suivantes : Quels sont les mécanismes qui nous permettent de percevoir le monde qui nous entoure de manière unifiée et non ambiguë ? Comment les informations multisensorielles sont-elles mises en correspondance ? Les études que nous avons décrites jusqu'ici mettent en évidence un ensemble d'éléments impliqués dans ces processus. Sur cette base, nous allons tenter d'expliquer le fondement géométrique du procédé de mise en correspondance des données intrinsèques et extrinsèques.

Nous avons vu que certaines aires corticales sont principalement dédiées au traitement d'une modalité sensorielle, d'autres semblent intégrer plusieurs modalités, mais il n'est pas possible de mettre en évidence l'existence d'un codage dans un référentiel unique. Certains neurones semblent coder les informations dans un référentiel particulier mais peuvent être modulés par d'autres signaux tels que ceux de l'orientation des yeux par rapport tête ou de la tête par rapport au corps. La représentation multisensorielle du monde extérieur n'est donc pas codée dans une seule aire corticale. Elle est distribuée et ne semble pas être reposée sur un référentiel unique

5. DE LA PERCEPTION À L'ACTION

[Stein 1989]. Il semble donc difficile d'expliquer ce codage multisensoriel en termes de coordonnées liées à telle ou telle modalité. Peut-on néanmoins trouver un invariant géométrique qui permette d'expliquer ce processus ?

La clé du problème se trouve peut-être dans le positionnement des organes sensoriels par rapport à la tête comme on peut l'observer chez l'homme et la quasi totalité des animaux. Les yeux et les oreilles semblent en effet idéalement situés pour coder les données extéroceptives par rapport à un même égocentre visuo-auditif. Il ne s'agit pas de proposer que les égocentres spatiaux des systèmes auditif et visuel soient exactement superposés et définissent un point géométrique exact, mais plutôt de remarquer que la forte proximité de ces deux égocentres simplifie considérablement les transformations entre les référentiels liés à ces deux modalités. D'autre part, on peut penser que cet égocentre visuo-auditif n'est pas rigidement lié à la tête mais repose sur un processus plastique. D'après [Neelon et al. 2004], la vision et l'audition auraient des égocentres très voisins, situés dans le plan sagittal médian de la tête, légèrement en avant de l'axe interaural (très proche de l'axe interoculaire) pour des cibles frontales à $\pm 30^\circ$ et se rapprochant de l'axe interaural en fonction de l'excentricité et la distance de la cible. Les expériences psychophysiques menées dans cette étude se basent sur une analyse de la perception de l'alignement de sources auditives et de cibles visuelles. Chez les aveugles congénitaux, la localisation de l'égocentre auditif se situe au milieu de l'axe interaural qui se trouve être sur l'axe pivot de l'orientation de la tête [Sukemiya et al. 2008]. D'après ces mêmes auteurs, chez les personnes qui utilisent ou ont utilisé la perception visuelle, les égocentres auditif et visuel se superposent au milieu de l'axe interoculaire.

Au delà de l'audition et de la vision, le système vestibulaire semble lui aussi idéalement situé pour exprimer les données inertielles en ce même égocentre. Les capteurs situés dans chacune des deux oreilles internes sont idéalement positionnés pour délivrer une mesure moyenne de la direction de la gravité, ainsi que des vitesses de rotation et des accélérations linéaires de la tête, en cet égocentre.

Nous proposons donc l'existence d'un égocentre (ou origine spatiale) commun, localisé au niveau de la tête, pour le codage des données extéroceptives et des mesures inertielles allo-centrées. De nombreux éléments montrent qu'en cette origine le SNC dispose d'un codage relatif de la direction des axes des référentiels oculocentré, craniocentré et gravitaire. La figure 5.4 illustre le fait que les transformations entre deux référentiels R_1 et R_2 sont simplifiées lorsque leurs origines sont quasiment confondues. Dans ce cas, la mesure de trois angles suffit pour passer d'un référentiel à l'autre alors que six paramètres sont nécessaires (trois pour localiser l'origine du référentiel R_2 par rapport à R_1 et trois pour coder son orientation) lorsque l'écart entre les deux origines n'est pas négligeable.

On peut alors se demander si cette origine spatiale est également utilisée par le système somesthésique pour coder la représentation du corps dans l'espace. L'hypothèse de l'existence de références corps-centrées a souvent été proposée en neurosciences, comme nous l'avons

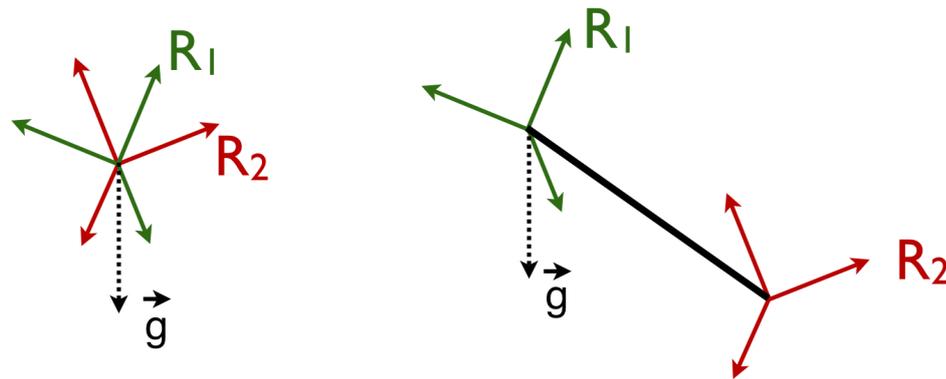


FIGURE 5.4 – Représentation des transformations entre deux référentiels ayant des origines coïncidentes ou séparées. R_1 représente par exemple le référentiel craniocentré dans lequel sont localisées les sources sonores et la direction de la gravité, alors que R_2 est lié à l'orientation des yeux. Le nombre de paramètres nécessaires au codage de la transformation est double lorsque l'écart entre les deux origines est non négligeable.

évoquée dans les chapitres précédents. Il a été mis en évidence que le cortex somesthésique construit une représentation de l'ensemble du corps dans laquelle la quantité de neurones utilisés pour le codage est proportionnelle à la sensibilité de la partie du corps correspondante. Il a été montré dans [Paillard 1999] qu'il existe une différence entre la représentation du corps utilisée pour la commande motrice et l'identification perceptive des différentes parties du corps. Cette représentation somatosensorielle de l'image du corps doit être fusionnée avec celle qui est donnée par la vision et l'audition. Par exemple, il a été montré que lorsqu'on tient un outil, les champs récepteurs visuels associés à la main sont modifiés pour prendre en compte le nouvel espace qu'il est possible d'atteindre avec l'outil [Iriki et al. 1996]. La prise en compte de références géométriques liées au corps est également essentielle pour l'exploration de l'environnement [McCluskey et Cullen 2007].

Nous proposons donc d'étendre notre modèle en faisant l'hypothèse que le SNC utilise la même origine spatiale pour le codage des données extéroceptives (vision et audition), allocentrées (gravitaire et inertielle) et somesthésiques (corps) et qu'il dispose en ce point d'un codage relatif de la direction du regard, de l'orientation de la tête, de la gravité et des axes liés à la géométrie du corps (direction de la colonne vertébrale, axe des épaules, etc. [Dijkerman et de Haan 2007]). Dans ce modèle, l'origine multisensorielle joue donc un rôle de pivot entre la représentation extéroceptive, la représentation allocentrée absolue (orientation et dynamique du corps par rapport au référentiel gravitaire absolu) et la représentation interne du corps. La forte densité de capteurs proprioceptifs au niveau du cou corrobore notre hypothèse, puisqu'elle met en évidence l'importance des processus visant relier la représentation du corps aux ancrages spatiaux construits au niveau de la tête.

Qu'en est-il du point de vue de la robotique ? Quel est l'avantage de considérer une telle ori-

5. DE LA PERCEPTION À L'ACTION

gine spatiale commune pour l'intégration multi-capteurs et la commande en robotique ? Comme nous l'avons expliqué au chapitre 2, il n'existe pas à ce jour de théorie générale permettant de justifier le choix d'une référence spatiale particulière pour la fusion multi-capteurs ou la commande référencée multi-capteurs. Actuellement, les méthodes les plus avancées en robotique humanoïde consistent à synthétiser la commande sur la base d'une pile de tâches permettant de réaliser simultanément un ensemble d'objectifs avec un ordre de priorité [Mansard et Chauvette 2007] [Saab et al. 2011]. Rappelons que chacun de ces objectifs est exprimé à l'aide d'une fonction de tâche, $e = s - s^*$, qui caractérise une erreur entre un vecteur de données capteurs s mesuré à l'instant courant et une valeur de référence s^* correspondant à la réalisation de la tâche. L'annulation de la fonction de tâche garantit la réalisation de la tâche par le biais du torseur d'interaction et du jacobien du robot. Actuellement, les fonctions de tâches sont choisies de manière ad hoc par le roboticien, pour réaliser au mieux les tâches en fonction des données capteurs disponibles. Ces fonctions de tâches peuvent coder des grandeurs de nature différente (position, orientation, vitesse, force, etc.) et peuvent être fonction de données délivrées par des capteurs différents occupant des positions variables. Contrairement aux méthodes globales reposant sur une étape de planification de trajectoire et une boucle de commande par retour d'état, qui peuvent être planifiées et exécutées de manière automatique (sous l'hypothèse de l'existence d'un processus de localisation robuste), il n'existe pas à ce jour de méthode permettant de synthétiser les fonctions de tâches automatiquement pour l'exécution d'un déplacement donné.

Exprimer l'ensemble des informations géométriques délivrées par les capteurs par rapport à une même origine spatiale pourrait être un moyen d'uniformiser la définition des fonctions de tâches. Les signaux relatifs à la perception d'un même amer de l'environnement, délivrés par différents capteurs, seraient ainsi directement mis en correspondance. Considérons par exemple le cas d'un robot muni d'un capteur tactile (recouvert d'une peau artificielle), d'un capteur de vision et d'un système de proprioception, et supposons que ce robot touche avec son doigt un élément de l'environnement. Le fait d'utiliser une même origine sensorielle pour tous les capteurs permettrait de détecter directement que la pression au bout du doigt, la vision du doigt et sa reconstruction proprioceptive, correspondent à un même point de l'espace. Sur cette base, le problème inverse consistant à associer automatiquement au mouvement de contact les différentes données sensorielles et par ce biais à définir les fonctions de tâches associées, pourrait être standardisé et simplifié. Chez l'homme, il est vraisemblable que la mise en correspondance active de données sensorielles (je touche cet objet que je vois, j'oriente mon regard vers cet insecte que j'entends,...), reposant sur la prise en compte d'une même origine multisensorielle, doit permettre de recalibrer continuellement les différents organes sensoriels.

L'idée de la prise en compte d'une origine multisensorielle commune que nous proposons est encore très générale. Des développements sont encore nécessaires pour qu'elle puisse concrètement être mise en œuvre sur des applications en robotique. Nous n'avons pas poussé

plus loin ces développements dans le cadre de cette thèse. Nous pensons cependant que ce concept d'une origine multisensorielle inspiré du fonctionnement du SNC constitue une base cohérente pour guider la disposition des capteurs sur les robots humanoïdes et pour développer un cadre théorique pour la synthèse automatique de tâches référencées multi-capteurs.

5.3 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre nous établissons un lien entre nos deux études en faisant un bilan des aires et des signaux qui modulent l'activité de ces aires lors de l'exécution de gestes d'atteinte visuellement guidés avec des directions du regard imposées. Nous formulons ensuite deux hypothèses sur le rôle fonctionnel de ces paramètres de position des yeux/tête, de la tête/corps et de la tête/gravité. La première concerne l'exploration de l'environnement et la seconde l'intégration multisensorielle. Dans la seconde partie de ce chapitre, nous proposons l'existence d'une origine multisensorielle où se superposeraient les différents référentiels codant les différentes informations sensorielles et permettrait de les mettre en relation. Nous discutons ensuite l'intérêt de cette origine multisensorielle en robotique pour relier les informations spatiales congruentes et aider à synthétiser automatiquement les fonctions de tâches.

6

Conclusion

En neurosciences, les travaux portant sur la représentation de l'espace ou plutôt sur sa construction sont nombreux. La majorité d'entre eux se sont orientés vers la recherche des référentiels qui seraient utilisés pour coder l'information spatiale dans les régions où le traitement spatial multisensoriel semble être le plus élaboré. Malheureusement, ces études dans cette région, qui est le cortex pariétal postérieur, n'ont pas révélé un référentiel unique. Elles ont néanmoins permis de structurer une dizaine d'aires cette région qui avait été initialement définie en seulement deux aires (aire 5 et 7) par [Brodmann 1905]. Plusieurs modèles décrivant le rôle fonctionnel de chacune de ces aires ont émergé. Le modèle le plus élaboré sur les référentiels utilisés par notre système nerveux central (SNC) au sein du cortex pariétal est présenté figure 2.4. Il reflète la présence de tous les référentiels mis en évidence (oculocentré, craniocentré et corps-centré) et mêmes ceux qui sont considérés comme intermédiaires. Ces référentiels intermédiaires sont considérés comme une étape de calcul lors de la transformation entre deux référentiels. Ce modèle montre également le rôle que peut avoir la position des yeux/tête et de la tête/corps dans ces transformations entre référentiels. On notera qu'il manque l'implication des signaux vestibulaires qui ne peuvent pas être négligés dans la modulation des neurones de certaines aires du cortex pariétal postérieur (voir figure 5.3). En parallèle à ces travaux, plusieurs études montrent que les signaux de positions des yeux/tête modulent un certain pourcentage de neurones d'un très grand nombre d'aires en amont et en aval du cortex pariétal postérieur (voir figure 5.3). Le rôle fonctionnel de ce phénomène distribué n'est pas encore élucidé. Cependant nous pouvons émettre des hypothèses sur le rôle fonctionnel tant en amont qu'en aval du cortex

6. CONCLUSION

pariétal.

En amont du cortex pariétal, notre étude électrophysiologique montre que des signaux de position de la tête par rapport au corps modulent une partie de l'activité neuronale de l'aire visuelle primaire (V1). Cette aire V1 peut être considérée comme la première étape du traitement cortical de la perception de l'espace. A partir de ce résultat et de ceux de la littérature, nous faisons ressortir deux résultats fondamentaux pour la compréhension de l'intégration multisensorielle.

- Le premier est que l'aire visuelle primaire présente une activité qui est modulée par un ensemble de signaux extra-rétiniens (vestibulaires, auditifs et somatiques (angle de vergence, positions des yeux/tête et de la tête/corps)). Un récapitulatif est présenté à la fin de notre étude électrophysiologique (voir figure 3.26).

- Le second est que nos résultats consolident l'hypothèse que les signaux de positions des yeux/tête et de la tête/corps sont présents de manière ubiquitaire au sein des aires du SNC. L'illustration de ce phénomène est présentée dans notre figure récapitulative des aires et connexions anatomiques non exhaustives impliquées dans la commande d'un geste visuellement guidé (voir figure 5.3).

Tout porte à croire que la représentation de l'espace se construit dès le début du traitement visuel. Il a également été montré que l'aire auditive primaire est modulée par la position des yeux [Werner-Reiss et al. 2003]. On peut donc étendre notre idée au fait que la construction de la représentation de l'espace débute dès le début du traitement sensoriel. Est ce que la représentation de l'espace se construit de manière distribuée au travers des aires impliquées dans le traitement des différentes modalités sensorielles ? ou bien, est ce que plusieurs représentations se construisent dans les aires impliquées dans chacune des modalités, tout en prenant en compte des informations provenant des autres modalités ? Ces questions restent entières.

Il serait intéressant, pour tenter d'y répondre, de mettre en relation toutes les études réalisées au sein des différents traitements sensoriels (anatomiques et fonctionnels). Le côté distribué de la construction de la représentation de l'espace rend particulièrement difficile la compréhension et la modélisation de ces mécanismes. En revanche, le fait que l'intégration multisensorielle commence dès le début du traitement sensoriel est un atout pour en comprendre le mécanisme étape par étape.

En aval du cortex pariétal, plusieurs études électrophysiologiques mettent en évidence qu'une partie des neurones de l'aire prémotrice dorsale (PMd) est modulée par l'orientation des yeux par rapport à la tête. Nous avons retranscrit le même protocole mis en œuvre par l'une de ces études dans un formalisme issu de la robotique. Ce protocole correspondait à l'exécution de gestes d'atteinte visuellement guidés, avec des directions du regard imposées. L'aire prémotrice dorsale est impliquée dans le calcul de la commande cinématique du bras. Une région du cortex

pariétal nommée PRR (Parietal Reach Region) code, d'après un consensus d'études, le vecteur de différence main-cible dans un référentiel oculocentré. Cette région (PRR) projette directement sur PMd. Basé sur ces informations, nous avons exprimé la commande cinématique de gestes d'atteinte visuellement guidés, avec direction du regard imposée, en utilisant le formalisme d'asservissement visuel qui est classiquement utilisé pour ce type de tâche en robotique. Cette étude nous a permis de mettre en évidence que toutes les articulations de la chaîne cinématique entre les yeux et la main doivent être pris en compte pour établir la commande si celle-ci est calculée à partir du vecteur de différence main-cible exprimée dans le référentiel de la caméra. On peut ainsi apporter un modèle pour expliquer pourquoi les neurones de l'aire PMd sont modulés par l'orientation des yeux par rapport à la tête. La position de l'œil se révélant être un paramètre intrinsèque à la loi de commande cinématique de même que l'orientation de la tête par rapport au corps. L'utilisation des formalismes issus de la robotique offre ainsi une nouvelle interprétation de la modulation neuronale, qui enrichit l'interprétation classique des transformations de coordonnées. Pour renforcer notre modèle, nous avons développé un réseau de neurones artificiels pour calculer la commande cinématique du bras à partir du vecteur de différence main-cible. Nous avons ensuite comparé l'activité interne à notre réseau de neurones artificiels avec celle enregistrée au sein de PMd. Nous avons montré que les neurones artificiels présentent les mêmes caractéristiques que les neurones biologiques. Ainsi, nous offrons une interprétation mathématique analytique puis une validation sous forme de réseau de neurones, classiquement utilisés en neurosciences, pour valider notre modèle.

La voie anatomique dédiée au mouvement du bras lors d'un geste d'atteinte pour lequel la cible est présente dans notre champ visuel commence dès l'aire V1 puis passe par les aires V6A et MIP et se poursuit dans les aires motrices par l'aire PMd. L'activité de ces aires présente des modulations dues aux signaux de positions des yeux/tête et probablement aussi dues aux signaux de positions de la tête/corps ([Batista et al. 2007] (hypothèse dans PMd), [Pellijeff et al. 2006] (augmentation du signal bold dans une aire homologue à PRR chez l'homme lors de déplacement de membres supérieur) et notre chapitre 4 (si notre modèle est bon)). Bien que ces modulations semblent présentes tout au long de cette voie anatomique, le rôle fonctionnel de ces signaux change. Dans l'aire V1 et jusqu'à l'aire V6A, ces deux signaux joueraient un rôle important dans l'intégration de signaux posturaux et visuels. Dans l'aire V6A et MIP, le mécanisme neuronal de localisation de la main et la prise de décision d'atteinte de la cible dont la localisation est connue, serait donc déjà réalisé. L'étude en IRMf chez l'homme montre que le signal BOLD est modifié par un changement postural des membres supérieurs au niveau de l'aire homologue à PRR. Ces résultats nous laissent suggérer que les signaux de positions des yeux/tête et de la tête/corps permettent la congruence entre la perception visuelle et proprioceptive du corps. Ainsi ces informations permettent de préparer le mouvement du bras. L'aire PMd calculerait alors la commande cinématique où les informations posturales de toutes les

6. CONCLUSION

articulations entre les yeux et la main (yeux/tête, tête/tronc, tronc/bras...) sont nécessaires à ce calcul (voir chapitre 4). Il n'est donc plus indispensable de réaliser des transformations de coordonnées à ce niveau cortical.

En robotique, nos études ont permis de nous interroger sur le transfert des connaissances issues des neurosciences. Par la figure 5.3, nous mettons en évidence que nos deux études sont très spécifiques et ne peuvent apporter de réponse directe à la question : Comment les informations multisensorielles sont mises en correspondance pour permettre une représentation de l'espace stable et non-ambiguë ? Les mécanismes neuronaux mis en place par notre SNC nécessite encore beaucoup d'études avant d'être compris et modélisés. Cependant, le travail réalisé nous a permis dans le chapitre précédent de proposer l'existence d'un égocentre multisensoriel. L'avantage d'une origine multisensorielle commune pourrait apporter une simplification dans la mise en relation de données spatiales délivrées par les différents capteurs. Cet avantage pourrait suggérer une autre manière de commander les robots dans le sens où cette fusion de données multi-sensorielles permettrait de relier les différentes tâches que doit réaliser un robot, telles que le maintien de la projection du centre de masse ou du centre de pression dans le polygone de sustentation, la verticalité du torse, l'orientation des caméras, un mouvement de la main, etc... Bien que ce ne soit qu'une perspective, elle offre une base intéressante à la question de commande référencée multi-capteurs et la fusion de données capteurs différentes qui sont encore rarement abordées en robotique.

References

106

- ANASTASOPOULOS, D. ET MERGNER, T. 1982. Canal-neck interaction in vestibular nuclear neurons of the cat. *Experimental Brain Research*, 46(2) :269-280. 58
- ANDERSEN, R. 1997. Multimodal integration for the representation of space in the posterior parietal cortex. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.*, 352(1360) :1421-1428. 5, 6, 8, 9, 11
- ANDERSEN, R., BRACEWELL, R., BARASH, S., GNADT, J., ET FOGASSI, L. 1990. Eye position effects on visual, memory, and saccade-related activity in areas lip and 7a of macaque. *The Journal of Neuroscience*, 10(4) :1176-1196. 106
- ANDERSEN, R., BROTCHE, P., ET MAZZONI, P. 1992. Evidence for the lateral intraparietal area as the parietal eye field. *Current opinion in neurobiology*, 2(6) :840-846. 57
- ANDERSEN, R. ET BUNEO, C. 2002. Intentional maps in the posterior parietal cortex. *Annu. Rev. Neurosci.*, 25 :189-220. 8, 62
- ANDERSEN, R. ET CUI, H. 2009. Intention, action planning, and decision making in parietal-frontal circuits. *Neuron*, 63(5) :568-583. 104, 105
- ANDERSEN, R., ESSICK, G., ET SIEGEL, R. 1985. Encoding of spatial location posterior parietal neurons. *Science*, 230 :456-458. 26, 110
- ARMSTRONG, H. 1988. Anthropometry and mass distribution for human analogues. volume 1. military male aviators. -, 1-53. 77
- ASADA, H. ET SLOTINE, J. 1986. *Robot Analysis and control*. John Wiley. 63
- AVILLAC, M., BEN HAMED, S., ET DUHAMEL, J. 2007. Multisensory integration in the ventral intraparietal area of the macaque monkey. *Journal Neuroscience*, 27 :1922-1932. 56
- AVILLAC, M. ANS DENEVE, S., OLIVIER, E., POUGET, A., ET J.R., D. 2005. Reference frames for representing visual and tactile locations in parietal cortex. *Nature Neuroscience*, 8 :941-949. 56
- BAERLOCHER, P. ET BOULIC, R. 2003. An inverse kinematics architecture enforcing an arbitrary number of strict priority levels. *The visual computer*, 20(6) :402-417. 78
- BAILEY, T. ET DURRANT-WHYTE, H. 2006. Simultaneous localization and mapping : part ii. *Robotics and Automation Magazine - IEEE*, 13(3) :108-117. 18

- BAKER, J., PATEL, G., CORBETTA, M., ET SNYDER, L. 2006. Distribution of activity across the monkey cerebral cortical surface, thalamus and midbrain during rapid, visually guided saccades. *Cerebral Cortex*, 16 :447-459. 108
- BARLOW, H. 1972. Single units and sensation : A neuron doctrine for perceptual psychology ? *Perception*, 1 :371-394. 55
- BATISTA, A., BUNEO, C., SNYDER, L., ET ANDERSEN, R. 1999. Reach plans in eye-centered coordinates. *Science*, 285(5425) :257-260. 7, 65, 108, 111
- BATISTA, A., SANTHANAM, G., B.M., Y., RYU, S., A., A., ET SHENOY, K. 2007. Reference frames for reach planning in macaque dorsal premotor cortex. *Journal of neurophysiology*, 98, 966-983. 12, 68, 69, 102, 106, 119
- BATTAGLIA-MAYER, A., FERRAINA, S., MITSUDA, T., ET ET AL. 2000. Early coding of reaching in the parietooccipital cortex. *J. Neurophysiol* 83 :2374-2391. 8, 65
- BESSIÈRE, P., LAUGIER, C., ET SIEGWART, R. 2008. *Probabilistic Reasoning and Decision Making in Sensory-Motor Systems*. Springer Tracts in Advanced Robotics, Vol. 46. 18
- BEURZE, S., TONI, I., PISELLA, L., ET MEDENDORP, W. 2010. Reference frames for reach planning in human parietofrontal cortex. *Journal of neurophysiology*, 104(3) :1736-1745. 64, 108
- BEURZE, S., VAN PELT, S., ET MEDENDORP, W. 2006. Behavioral reference frames for planning human reaching movements. *Journal of neurophysiology*, 96(1) :352-362. 11, 64, 66, 108
- BIGUER, B., DONALDSON, M., HEIN, A., ET JEANNEROD, M. 1988. Neck muscle vibration modifies the representation of visual motion and direction in man. *Brain*, 111 :1405-1424. 26, 57, 58
- BLANGERO, A., OTA, H., ROSSETTI, Y., FUJII, T., OHTAKE, H., TABUCHI, M., VIGHETTO, A., YAMADORI, A., VINDRAS, P., ET PISELLA, L. 2010. Systematic retinotopic reaching error vectors in unilateral optic ataxia. *Cortex*, 46(1) :77-93. 64, 66, 108
- BLOHM, G., KEITH, G., ET CRAWFORD, J. 2009. Decoding the cortical transformations for visually guided reaching in 3d space. *Cerebral Cortex*, 19 :1372-1393. 11, 62, 66, 74, 85, 87, 89, 102
- BOCK, O. 1986. Contribution of retinal versus extraretinal signals towards visual localization in goal-directed movements. *Exp. Brain Res.*, 64 :476-482. 69
- BORRA, E., BELMALIH, A., CALZAVARA, R., GERBELLA, M., MURATA, A., ROZZI, S., ET LUPPINO, G. 2008. Cortical connections of the macaque anterior intraparietal (aip) area. *Cerebral Cortex*, 18(5) :1094-1111. 106
- BOSCO, G., POPPELE, R., ET EIAN, J. 2000. Reference frames for spinal proprioception : limb endpoint based or jointlevel based ? *J. Neurophysiol.* 83 :2931-2945. 64
- BOUSSAOU, D. 1995. Primate premotor cortex : modulation of preparatory neuronal activity by gaze angle. *Journal of Neurophysiology*, 73(2) :886-890. 69, 106

- BOUSSAOUD, D. ET BREMMER, F. 1999. Gaze effects in the cerebral cortex : reference frames for space coding and action. *Exp. Brain Res.*, 128, 170-180. 69, 102
- BOUSSAOUD, D., JOUFFRAIS, C., ET BREMMER, F. 1998. Eye position effects on the neuronal activity of dorsal premotor cortex in the macaque monkey. *Journal of neurophysiology*, 80 :1132-1150. 12, 69
- BOUSSAOUD, D. ET WISE, S. 1993. Primate frontal cortex : effects of stimulus and movement. *Experimental Brain Research*, 95(1) :28-40. 85, 106
- BREMMER, F. 2000. Eye position effects in macaque area v4. *Neuroreport.*, 11(6) :1277-1283. 10, 106
- BREMMER, F., ILG, U., THIELE, A., DISTLER, C., ET HOFFMANN, K. 1997. Eye position effects in monkey cortex. i. visual and pursuit-related activity in extrastriate areas mt and mst. *Journal of neurophysiology*, 77(2) :944-961. 10, 106
- BREMMER, F., KLAM, F., DUHAMEL, J., BEN HAMED, S., ET GRAF, W. 2002. Visual-vestibular interactive responses in the macaque ventral intraparietal area vip. *Eur J Neurosci.*, 16(8) :1569-1586. 7, 9, 106
- BRODMANN, K. 1905. Beiträge zur histologischen lokalisation der grosshirnrinde : dritte mitteilung : Die rindenfelder der niederen affen. *Journal für Psychologie und Neurologie*, 4 :177-226. 117
- BROTCHIE, P., ANDERSEN, R., SNYDER, L., ET GOODMAN, S. 1995. Head position signals used by parietal neurons to encode locations of visual stimuli. *Nature*, 18 ;375(6528) :232-235. 26, 54, 57, 58, 59, 65, 106, 110
- BROTCHIE, P., LEE, M., CHEN, D.-Y., LOURENSZ, M., JACKSON, G., ET BRADLEY, W. 2003. Head position modulates activity in the human parietal eye fields. *NeuroImage*, 18 :178-184. 26, 54, 57, 110
- BUISSERET, P. 1988. Suppression of cervical afferents impairs visual cortical cells development. *The Head-Neck Motor System, Chapter 27*. 57
- BUNEO, C. ET ANDERSEN, R. 2006. The posterior parietal cortex : sensorimotor interface for the planning and online control of visually guided movements. *Neuropsychologia*, 44(13) :2594-2606. 62
- BUNEO, C., JARVIS, M., BATISTA, A., ET ANDERSEN, R. 2002. Direct visuomotor transformations for reaching. *Nature*, 416(6881) :632-636. 62, 65
- CADENAT, V. 1999. Commande référencée multi-capteurs pour la navigation d'un robot mobile. *Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier de Toulouse, No 3565*. 22
- CARROZZO, M., MCINTYRE, J., ZAGO, M., ET LACQUANITI, F. 1999. Viewer-centered and body-centered frames of reference in direct visuomotor transformations. *Experimental Brain Research*, 129(2) :201-210. 62
- CHANG, S., PAPADIMITRIOU, C., ET SNYDER, L. 2009. Using a compound gain field to compute a reach plan. *Neuron*, 64(5) :744-755. 64, 108

- CHAUMETTE, F. ET HUTCHINSON, S. 2006. Visual servo control, part 1 : Basic approaches. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 13(4) :82-90. 71
- CHAUMETTE, F. ET HUTCHINSON, S. 2007. Visual servo control, part 2 : Advanced approaches. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 14(1) :109-118. 71
- CHEN, A., DEANGELIS, G., ET ANGELAKI, D. 2011. A comparison of vestibular spatio-temporal tuning in macaque parietoinsular vestibular cortex, ventral intraparietal area, and medial superior temporal area. *The journal of Neuroscience*, 31(8) :3082-3094. 109
- CHOWDHURY, S., TAKAHASHI, K., DEANGELIS, G., ET ANGELAKI, D. 2009. Does the middle temporal area carry vestibular signals related to self-motion ? *The journal of Neuroscience*, 29(38) :12020-12030. 109
- CISEK, P. ET KALASKA, J. 2002. Modest gaze-related discharge modulation in monkey dorsal premotor cortex during a reaching task performed with free fixation. *Journal of neurophysiology*, 88 :1064-1072. 68, 69, 102
- CLAVAGNIER, S., FALCHIER, A., ET KENNEDY, H. 2004. Long-distance feedback projections to area v1 : implications for multisensory integration, spatial awareness, and visual consciousness. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 4(2) :117-126. 106
- COHEN, Y. 2009. Multimodal activity in the parietal cortex. *Hearing research*, 258(1-2) :100-105. 6
- COHEN, Y. ET ANDERSEN, R. 2002. A common reference frame for movement plans in the posterior parietal cortex. *Nat. Rev. Neurosci.*, 3 :553-562. 11, 62, 65
- COLBY, C. ET DUHAMEL, J. 1991. Heterogeneity of extrastriate visual areas and multiple parietal areas in the macaque monkey. *Neuropsychologia*, 29(6) :517-537.. 7
- COLBY, C., DUHAMEL, J., ET GOLBERG, M. 1993. Ventral intraparietal area of the macaque : Anatomic location and visual response properties. *Journal of neurophysiology*, 69(3) :902-914. 7
- COLBY, C., DUHAMEL, J., ET GOLBERG, M. 1996. Visual, presaccadic, and cognitive activation of single neurons in monkey lateral intraparietal area. *Journal of neurophysiology*, 76(5) :2841-52. 6
- CORNEIL, B., OLIVIER, E., ET MUNOZ, D. 2004. Visual responses on neck muscles reveal selective gating that prevents express saccades. *Neuron*, 42(5) :831-841. 58
- CRAMMOND, D. ET KALASKA, J. 1989. Neuronal activity in the primate parietal cortex area 5 varies with intended movement direction during an instructing-delay period. *Exp. Brain Res.*, (76) :458-462. 64
- CRAWFORD, J., MEDENDORP, W., ET MAROTTA, J. 2004. Spatial transformations for eye-hand coordination. *Journal of Neurophysiology*, 92(1) :10-19. 66
- DENEVE, S., LATHAM, P., ET POUGET, A. 2001. Efficient computation and cue integration with noisy population code. *Nat. Neurosci.*, 4 :826-831. 9

- DESMURGET, M., PÉLISSON, D., ROSSETTI, Y., ET PRABLANC, C. 1998. From eye to hand : planning goal-directed movements. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 22(6) :761-788. 11
- DIJKERMAN, H. ET DE HAAN, E. 2007. Somatosensory processing subserving perception and action : Dissociations, interactions, and integration. *Behavioral and brain sciences*, 30(2) :224-239. 113
- DUBOIS, D. ET PRADE, H. 1980. Fuzzy sets and systems : Theory and applications. *Academic Press (APNet)*, Vol.144, p.393. 18
- DUFFY, C. 1998. Mst neurons respond to optic flow and translational movement. *Journal of neurophysiology*, 80(4) :1816-1827. 106
- DUHAMEL, J., BREMMER, F., BENHAMED, S., ET GRAF, W. 1997. Spatial invariance of visual receptive fields in parietal cortex neurons. *Nature*, 389 :845-848. 26, 106
- DURRANT-WHYTE, H. ET BAILEY, T. 2006. Simultaneous localization and mapping : Part. i. *Robotics and Automation Magazine - IEEE*, 13(2) :99-110. 18
- D.W., S. ET FREDRICKSON, J. 1971. Rhesus monkey vestibular cortex : a bimodal primary projection field. *Science*, 172 :280-281. 106
- ENGEL, K., FLANDERS, M., ET SOECHTING, J. 2002. Oculocentric frames of reference for limb movement. *Archives italiennes de biologie*, 140(3) :211-219. 62
- ESPIAU, B., CHAUMETTE, F., ET RIVES, P. 1992. A new approach to visual servoing in robotics. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 8 :313-326. 71, 73
- FALCHIER, A., CLAVAGNIER, S., BARONE, P., ET KENNEDY, H. 2002. Anatomical evidence of multimodal integration in primate striate cortex. *The Journal of Neuroscience*, 22(13) :5749-5759. 11
- FALCHIER, A., SCHROEDER, C., HACKETT, T., LAKATOS, P., NASCIMENTO-SILVA, S., ULBERT, I., KARMOS, G., ET SMILEY, J. 2010. Projection from visual areas v2 and prostriata to caudal auditory cortex in the monkey. *Cerebral Cortex*, 20(7) :1529-1538. 106
- FASOLD, O., HEINAU, J., TRENNER, M.U. ANS VILLRINGER, A., ET WENZEL, R. 2008. Proprioceptive head posture-related processing in human polysensory cortical areas. *NeuroImage*, 40 :1232-1242. 57, 106
- FELLEMAN, D. ET VAN ESSEN, D. 1991. Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex. *Cerebral cortex*, 1(1) :1-47. 106
- FLANDERS, M., HELMS-TILLERY, S., ET JF., S. 1992. Early stages in a sensorimotor transformation. *Behav. Brain. Sci.*, 15 :309-362. 8, 62
- FLASH, T. ET HOGAN, N. 1985. The coordination of arm movements : An experimentally confirmed mathematical model. *Journal of Neuroscience*, 5 : 1688-1703. 66, 81
- FREEDMAN, E. ET SPARKS, D. 1997. Eye-head coordination during head-unrestrained gaze shifts in rhesus monkeys. *Journal of Neurophysiology*, 77(5) :2328-2348. 58

- FREEDMAN, E., STANFORD, T., ET SPARKS, D. 1996. Combined eye-head gaze shifts produced by electrical stimulation of the superior colliculus in rhesus monkeys. *Journal of Neurophysiology*, 76(2) :927-952. 58, 109, 110
- FRIES, W. 1984. Cortical projections to the superior colliculus in the macaque monkey : a retrograde study using horseradish peroxidase. *The Journal of Comparative Neurology*, 230(1) :55-76. 106, 109
- FU, K., SHAH, A., O'CONNELL, M., MCGINNIS, T., ECKHOLDT, H., LAKATOS, P., SMILEY, J., ET SCHROEDER, C. 2004. Timing and laminar profile of eye-position effects on auditory responses in primate auditory cortex. *Journal of neurophysiology*, 92(6) :3522-31. 10
- FUKUSHIMA, J., AKAO, T., SHICHINOHE, N., KURKIN, S., KANEKO, C., ET FUKUSHIMA, K. 2011. Neuronal activity in the caudal frontal eye fields of monkeys during memory-based smooth pursuit eye movements : Comparison with the supplementary eye fields. *Cerebral Cortex*, Epub ahead of print. 109
- FUKUSHIMA, J., AKAO, T., TAKEICHI, N., KURKIN, S., KANEKO, C., ET FUKUSHIMA, K. 2004. Pursuit-related neurons in the supplementary eye fields : discharge during pursuit and passive whole body rotation. *Journal of Neurophysiology*, 91 :2809-2825. 106
- FUNAHASHI, S., BRUCE, C., ET GOLDMAN-RAKIC, P. 1991. Neuronal activity related to saccadic eye movements in the monkey's dorsolateral prefrontal cortex. *Journal Neurophysiology*, 65 :1464-1483. 108
- GALLETTI, C. ET BATTAGLINI, P. 1989. Gaze-dependent visual neurons in area v3a of monkey prestriate cortex. *J Neurosci*, 9(4) : 1112-25. 10, 106
- GALLETTI, C., BATTAGLINI, P., ET FATTORI, P. 1993. Parietal neurons encoding spatial locations in craniotopic coordinates. *Exp. Brain Res.*, 96 : 221-229. 26, 106
- GALLETTI, C., BATTAGLINI, P., ET FATTORI, P. 1995. Eye position influence on the parieto-occipital area po (v6) of the macaque monkey. *Eur J Neurosci*, 7(12) : 2486-501. 10
- GALLETTI, C., FATTORI, P., BATTAGLINI, P., SHIPP, S., ET ZEKI, S. 1996. Functional demarcation of a border between areas v6 and v6a in the superior parietal gyrus of the macaque monkey. *Eur J Neurosci*, 8 :30-52.. 108
- GALLETTI, C., KUTZ, D.F. GAMBERINI, M., BREVEGLIERI, R., ET FATTORI, P. 2003. Role of the medial parieto-occipital cortex in the control of reaching and grasping movements. *Exp Brain Research*, 153 :158-170. 108, 109
- GATTAS, R., SOUSA, A., MISHKIN, M., ET UNGERLEIDER, L. 1997. Cortical projections of area v2 in the macaque. *Cerebral Cortex*, 7(2) :110-129. 106
- GAUTHIER, G., NOMMAY, D., ET VERCHER, J. 1990. The role of ocular muscle proprioception in visual localization of targets. *Science*, 249(4964) : 58-61. 26
- GEORGOPOULOS, A., SCHWARTZ, A., ET KETTNER, R. 1986. Neural population coding of movement direction. *Science*, 233 :1416-1419. 11, 64

- GHEZ, C., FAVILLA, M., GHILARDI, M., GORDON, J., BERMEJO, R., ET PULLMAN, S. 1997. Discrete and continuous planning of hand movements and isometric force trajectories. *Experimental Brain Research*, 115(2) :217-233. 64, 108
- GOODALE, M. ET MILNER, A. 1992. Separate visual pathways for perception and action. *Trends in neurosciences*, 15(1) :20-25. 62
- GOTTLIEB, J. 2007. From thought to action : the parietal cortex as a bridge between perception, action, and cognition. *Neuron*, 53(1) :9-16. 105
- GRAZIANO, M. 2001. Is reaching eye-centered, body-centered, hand-centered, or a combination ? *Rev Neurosci.*, 12(2) :175-85. 8, 9, 11
- GRAZIANO, M., COOKE, D., ET TAYLOR, C. 2000. Coding the location of the arm by sight. *Science* 290 :1782-1786. 66
- GRÜSSER, O., GULDIN, W., LEFÈBRE, J., ET PAUSE, M. 1990. Localization and responses of neurones in the parieto-insular vestibular cortex of awake monkeys (macaca fascicularis). *The Journal of physiology*, 430(1) :537-557. 106
- GRÜSSER, O., GULDIN, W., LEFÈBRE, J., ET PAUSE, M. 1992. Cortical representation of head-in-space movement and some psychophysical experiments on head movement. *The Head-Neck Sensory Motor System - Oxford University Press*, 497-509. 25
- GUIGON, E., BARADUC, P., ET DESMURGET, M. 2007. Computational motor control : Redundancy and invariance. *Journal of neurophysiology*, 97 :331-347. 66, 81
- GULDIN, W., AKBARIAN, S., ET GRÜSSER, O. 1992. Cortico-cortical connections and cytoarchitectonics of the primate vestibular cortex : a study in squirrel monkeys (saimiri sciureus). *The Journal of physiology*, 326 :375-401. 106
- GUO, K. ET LI, C.-Y. 1997. Eye position-dependent activation of neurones in striate cortex of macaque. *NeuroReport*, 8 :1405-1409. 10, 25
- GUYONNEAU, R., VANRULLEN, R., ET THORPE, S. 2004. Temporal codes and sparse representations : a key to understanding rapid processing in the visual system. *Journal of Physiology-Paris*, 98(4-6) :487-497. 56
- HAGAN, M. ET DEMUTH, H. 1999. Neural networks for control. *Proceedings of the 1999 American Control Conference, San Diego, CA*, pp. 1642-1656. 90
- HAGGARD, P. 2008. Human volition : towards a neuroscience of will. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(12) :934-946. 105
- HARRIS, C. ET WOLPERT, D. 1998. Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*, 394(6695) :725-6. 66, 81
- HELMS-TILLERY, S., SOECHTING, J., ET EBNER, T. 1996. Somatosensory cortical activity in relation to arm posture : nonuniform spatial tuning. *J. Neurophysiol.* 76 :2423-2438. 63
- HENRIQUES, D. ET CRAWFORD, J. 2002. Role of eye, head, and shoulder geometry in the planning of accurate arm movements. *Journal of neurophysiology*, 87 :1677-1685. 66

- HENRIQUES, D., KLIER, E., SMITH, M., LOWY, D., ET CRAWFORD, J. 1998. Gaze-centered remapping of remembered visual space in an open-loop pointing task. *Journal of Neuroscience*, 18(4) :1583-1594. 66
- HOFF, B. 1994. A model of duration in normal and perturbed reaching movement. *Biological Cybernetics*, 71(6) :481-488. 81
- HOFF, B. ET ARBIB, M. 1993. Models of trajectory formation and temporal interaction of reach and grasp. *Journal of Motor Behavior*, 25(3) :175-192. 66, 81, 92, 94
- ICHIHARA-TAKEDA, S. ET FUNAHASHI, S. 2007. Activity of primate orbitofrontal and dorsolateral prefrontal neurons : task-related activity during an oculomotor delayed-response task. *Exp Brain Research*, 181 :409-425. 108
- IRIKI, A., TANAKA, M., ET IWAMURA, Y. 1996. Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurones. *Neuroreport*, 7(14) :2325-2330. 113
- JOHNSON, P., FERRAINA, S., BIANCHI, L., ET CAMINITI, R. 1996. Cortical network for visual reaching : Physiological and anatomical organization of frontal and parietal lobe arm regions. *Cereb Cortex*, 6(2) :102-119. 7, 62, 63
- JONES, E. ET POWEL, T. 1970. An anatomical study of converging sensory pathways within the cerebral cortex of monkey. *Brain* 93 :793-820. 63
- JOUFFRAIS, C. ET BOUSSAOU, D. 1999. Neuronal activity related to eye-hand coordination in the primate premotor cortex. *Exp. Brain Res.*, 128 :205-209. 69, 102
- JOUFFRAIS, C., ROUILLER, E., ET BOUSSAOU, D. 2000. The dorsal premotor cortex : gaze signals and directional coding. *Soc. for Neurosciences Meeting, New Orleans, LA, USA, Vol 26, p 68.1.* 3, 61, 62, 68, 69, 74, 78, 82, 86, 87, 91, 100, 101
- KALASKA, J., CAMINITI, R., ET GEORGOPUOLOS, A. 1983. Cortical mechanisms related to the direction of two-dimensional arm movements : Relations in parietal area 5 and comparison with motor cortex. *Exp. Brain Res.* 51 :247-260. 64
- KANOUN, O. 2008. Task-driven planning for humanoid robots. *Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier de Toulouse.* 22
- KAYSER, C. ET LOGOTHETIS, N. 2007. Do early sensory cortices integrate cross-modal information ? *Brain structure and function*, 212(2) :121-132. 58
- KHOKHOTVA, M., ONO, H., ET MAPP, A. 2005. The cyclopean eye is relevant for predicting visual direction. *Vision research*, 45(18) :2339-2345. 74
- KLAM, F. ET GRAF, W. 2006. Discrimination between active and passive head movements by macaque ventral and medial intraparietal cortex neurons. *The Journal of physiology*, 574(2) :367-386. 54, 106, 108
- KUTZ, D., FATTORI, P., GAMBERINI, M., BREVEGLIERI, R., ET GALLETI, C. 2003. Early- and late-responding cells to saccadic eye movements in the cortical area v6a of macaque monkey. *Exp Brain Research*, 149 :83-95. 108

- LACKNER, J. ET LEVINE, M. 1979. Changes in apparent body orientation and sensory localization induced by vibration of postural muscles : Vibratory myesthetic illusions. *Aviation, space, and environmental medicine*, 50 :346-354. 58
- LACQUANITI, F. GUIGON, E. BIANCHI, L., ET ET AL. 1995. Representing spatial information for limb movement. *Cerebral Cortex* 5 :391-409. 64
- LACQUANITI, F. ET CAMINITI, R. 1998. Visuo-motor transformations for arm reaching. *European Journal of Neuroscience*, 10(1) :195-203. 62
- LAMIRAUX, F., BONNAFOUS, D., ET LEFEBVRE, O. 2004. Reactive path deformation for nonholonomic mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 20(6) :967-977. 21
- LATOMBE, J. 1991. *Robot Motion Planning*. Kluwer Academic. 21
- LEE, J., WILLIFORD, T., ET MAUNSELL, J. 2007. Spatial attention and the latency of neuronal responses in macaque area v4. *Journal Neuroscience*, 27 :9632-9637. 56
- LEWIS, J. ET VAN ESSEN, D. 2000. Corticocortical connections of visual, sensorimotor, and multimodal processing areas in the parietal lobe of the macaque monkey. *The Journal of comparative neurology*, 428(1) :112-137. 57, 106, 109
- LU, S., GUIDO, W., VAUGHAN, J., ET SHERMAN, S. 1995. Latency variability of responses to visual stimuli in cells of the cat's lateral geniculate nucleus. *Exp Brain Res*, 105 :7-17. 34
- LUPPINO, G., MURATA, A., GOVONI, P., ET MATELLI, M. 1999. Largely segregated parietofrontal connections linking rostral intraparietal cortex (areas aip and vip) and the ventral premotor cortex (areas f5 and f4). *Experimental Brain Research*, 128(1) :181-187. 106, 109
- MALIS, E., CHAUMETTE, F., ET BOUDET, S. 1999. 2 1/2 d visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15(2) :238-250. 71
- MANSARD, N. ET CHAUMETTE, F. 2007. Task sequencing for high-level sensor-based control. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(1) :60-72. 22, 114
- MANSARD, N., STASSE, O., CHAUMETTE, F., ET YOKOI, K. 2007. Visually-guided grasping while walking on a humanoid robot. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3041-3047. 22
- MARZOCCHI, N., BREVEGLIERI, R., GALLETTI, C., ET FATTORI, P. 2008. Reaching activity in parietal area v6a of macaque : eye influence on arm activity or retinocentric coding of reaching movements ? *The Journal of neuroscience*, 27(3) :775-89. 106
- MAUNSELL, J. ET GIBSON, J. 1992. Visual response latencies in striate cortex of the macaque monkey. *Journal of Neurophysiology*, 68(4) :1332-1344. 35, 56
- MAUNSELL, J. ET VAN ESSEN, D. 1983. The connections of the middle temporal visual area (mt) and their relationship to a cortical hierarchy in the macaque monkey. *The Journal of neuroscience*, 3(12) :2563-2586. 106
- MCCLUSKEY, M. ET CULLEN, K. 2007. Eye, head, and body coordination during large gaze shifts in rhesus monkeys : movement kinematics and the influence of posture. *Journal of neurophysiology*, 97(4) :2976-2991. 55, 58, 110, 113

- MCGUIRE, L. ET SABES, P. 2009. Sensory transformations and the use of multiple reference frames for reach planning. *Nat Neurosci.*, 12(8) :1056-61. 8, 9
- MCINTYRE, J., STRATTA, F., ET LACQUANITI, F. 1997. Viewer-centered frame of reference for pointing to memorized targets in three-dimensional space. *Journal of neurophysiology*, 78(3) :1601-18. 8, 11
- MEDENDORP, W. ET CRAWFORD, J. 2002. Visuospatial updating of reaching targets in near and far space. *Neuroreport*, 13(5) :633-636. 66
- MEDENDORP, W., GOLTZ, H., VILIS, T., ET CRAWFORD, J. 2003. Gaze-centered updating of visual space in human parietal cortex. *Journal of Neuroscience*, 23(15) :6209-6214. 65
- MEILLAND, M., COMPORT, A., ET RIVES, P. 2010. A spherical robot-centered representation for urban navigation. *IEEE - Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 5196-5201. 18
- MITILINEOS, S. ET THOMOPOULOS, S. 2011. Mind : A nonparametric decision fusion method for accurate indoor localization using sensors with monotonically increasing error functions. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 47(2) :1498-1506. 18
- MULLETTE-GILLMAN, O., COHEN, Y., ET GROH, J. 2005. Eye-centered, head-centered, and complex coding of visual and auditory targets in the intraparietal sulcus. *Journal of Neurophysiology*, 94(4) :2331-52. 8, 9, 106
- MURATA, A., GALLESE, V., KASEDA, M., ET SAKATA, H. 1996. Parietal neurons related to memory-guided hand manipulation. *Journal of Neurophysiology*, 75(5) :2180-2186. 7, 109
- MUSHIAKE, H., TANATSUGU, Y., ET TANJI, J. 1997. Neuronal activity in the ventral part of premotor cortex during target-reach movement is modulated by direction of gaze. *Journal of neurophysiology*, 78(1) :567-571. 68, 69
- NAGY, B. ET CORNEIL, B. 2010. Representation of horizontal head-on-body position in the primate superior colliculus. *Journal Neurophysiology*, 103 :858-874. 27, 54, 57, 106
- NAKAMURA, Y. 1991. Advanced robotics : Redundancy and optimization. *Addison- Wesley Longman Publishing*. 78
- NEELON, M., BRUNGART, D., ET SIMPSON, B. 2004. The isoazimuthal perception of sounds across distance : A preliminary investigation into the location of the audio egocenter. *The Journal of neuroscience*, 24(35) :7640-7647. 112
- ORAM, M. 2005. Integrating neuronal coding into cognitive models : Predicting reaction time distributions. *Network*, 16 :377-400. 56
- ORAM, M. 2010. Contrast induced changes in response latency depend on stimulus specificity. *Journal of Physiology*, 104 :167-175. 56
- PAILLARD, J. 1999. Body schema and body image : A double dissociation in deafferented patients. *Motor control, today and tomorrow*, 197-214. 113
- PALIWAL, M. ET KUMAR, U. 2009. Neural networks and statistical techniques : A review of applications. *Expert Systems with Applications*, 36(1) :2-17. 18

- PASSARELLI, L., ROSA, M., GAMBERINI, M., BAKOLA, S., BURMAN, K., FATTORI, P., ET GALLETI, C. 2011. Cortical connections of area v6av in the macaque : a visual-input node to the eye/hand coordination system. *The Journal of Neuroscience*, 31(5) :1790-1801. 106, 108
- PELLIJEFF, A., BONILHA, L., MORGAN, P., MCKENZIE, K., ET JACKSON, S. 2006. Parietal updating of limb posture : an event-related fmri study. *Neuropsychologia*, 44(13) :2685-3932. 7, 119
- PESARAN, B., NELSON, M., ET ANDERSEN, R. 2006. Dorsal premotor neurons encode the relative position of the hand, eye, and goal during reach planning. *Neuron*, 51 :125-134. 65, 102
- PETIT, L. ET BEAUCHAMP, M. 2003. Neural basis of visually guided head movements studied with fmri. *Journal neurophysiol.*, 89 :2516-2527. 25, 110
- POLJAC, E. ET VAN DEN BERG, A. 2003. Representation of heading direction in far and near head space. *Experimental Brain Research*, 151(4) :501-513. 66
- POUGET, A., DENEVE, S., ET DUHAMEL, J. 2002. A computational perspective on the neural basis of multisensory spatial representations. *Nat Rev Neurosci.*, 3(9) :741-747. 62
- POUGET, A., DUCOM, J.-C., TORRI, J., ET BAVELIER, D. 2002. Multisensory spatial representations in eye-centered coordinates for reaching. *Cognition*, 83, B1-B11. 7, 8, 9, 25, 65, 66, 103, 110
- POUGET, A. ET SEJNOWSKI, T. 1994. A neural model of the cortical representation of egocentric distance. *Cereb Cortex.*, 4(3) :314-329. 9
- POUGET, A. ET SEJNOWSKI, T. 1997. Spatial transformations in the parietal cortex using basis function. *J. Cogn. Neurosci.*, 9(2) :222-237. 9, 65
- PRATS, M., MARTINET, P., DEL POBIL, A., ET LEE, S. 2007. Vision force control in task-oriented grasping and manipulation. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1320-1325. 22
- PREVOSTO, V., GRAF, W., ET UGOLINI, G. 2011. Proprioceptive pathways to posterior parietal areas mip and lipv from the dorsal column nuclei and the postcentral somatosensory cortex. *The European journal of neuroscience*, 33(3) :444-460. 107, 108
- RICHMOND, F. ET ABRAHAMS, V. 1975. Morphology and distribution of muscle spindles in dorsal muscles of the cat neck. *Journal of neurophysiology*, 38(6) :1322-1339. 57
- RICHMOND, F., SINGH, K., ET CORNEIL, B. 1999. Marked non-uniformity of fiber-type composition in the primate suboccipital muscle obliquus capitis inferior. *Experimental Brain Research*, 125(1) :14-18. 57
- RIZZOLATTI, G., FOGASSI, L., ET GALLESE, V. 1997. Parietal cortex : from sight to action. *Current Opinion in Neurobiology*, 7(4) :562-567. 7
- ROLL, R., VELAY, J., ET ROLL, J. 1991. Eye and neck proprioceptive messages contribute to the spatial coding of retinal input in visually oriented activities. *Experimental brain research*, 85(2) :423-431. 26

- ROSENBLUTH, D. ET ALLMAN, J. 2002. The effects of gaze and fixation distance on the responses of neurons in v1, v2, and v4. *Neuron*, 33(1) :143-149. 10, 106
- ROSSETTI, Y., DESMURGET, M., ET PRABLANC, C. 1995. Vectorial coding of movement : vision, proprioception, or both ? *Journal of Neurophysiology*, 74(1) :457-463. 64, 108
- ROWLAND, B., QUESSY, S., STANFORD, T., ET STEIN, B. 2007. Multisensory integration shortens physiological response latencies. *Journal Neurosci*, 27 :5879-5884. 56
- RUSSO, G. ET BRUCE, C. 1993. Effect of eye position within the orbit on electrically elicited saccadic eye movements : a comparison of the macaque monkey's frontal and supplementary eye fields. *Journal of neurophysiology*, 69(3) :800-818. 106
- SAAB, L., RAMOS, O., MANSARD, N., SOUERES, P., ET FOURQUET, J. 2011. Generic dynamic motion generation with multiple unilateral constraints. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 114
- SADAGHIANI, S., HESSELMANN, G., FRISTON, K., ET KLEINSCHMIDT, A. 2010. The relation of ongoing brain activity, evoked neural responses, and cognition. *Frontiers in systems neuroscience*, 20(4) :1-14. 55
- SALINAS, E. ET ABBOTT, L. 2001. Coordinate transformations in the visual system : how to generate gain fields and what to compute with them. *Prog Brain Research*, 130 :175-190. 110
- SALINAS, E. ET THIER, P. 2000. Gain modulation : a major computational principle of the central nervous system. *Neuron*, 27 :15-21. 110
- SAMSON, C., LE BORGNE, M., ET ESPIAU, B. 1991. *Robot Control : The task function approach*. Oxford Sciences Publications. 21, 22, 78
- SAUVAN, X. ET PETERHANS, E. 1999. Orientation constancy in neurons of monkey visual cortex. *VISUAL COGNITION*, 6(1) :43-54. 11, 25, 55, 106, 110
- SCHALL, J., MOREL, A., KING, D., ET BULLIER, J. 1995. Topography of visual cortex connections with frontal eye field in macaque : convergence and segregation of processing streams. *Journal of Neuroscience*, 15(6) :4464-4487. 6
- SCHERBERGER, H. ET ANDERSEN, R. 2007. Target selection signals for arm reaching in the posterior parietal cortex. *The Journal of neuroscience*, 27(8) :2001-2012. 108
- SCHLACK, A., STERBING-D'ANGELO, S., HARTUNG, K., HOFFMANN, K., ET BREMMER, F. 2005. Multisensory space representations in the macaque ventral intraparietal area. *Journal of Neuroscience*, 25(18) :4616-4625. 7
- SCHLAG, J., SCHLAG-REY, M., ET PIGAREV, I. 1992. Supplementary eye field : influence of eye position on neural signals of fixation. *Experimental brain research*, 90(2) :302-306. 106
- SCHLICHT, E. ET SCHRATER, P. 2007. Impact of coordinate transformation uncertainty on human sensorimotor control. *Journal of neurophysiology*, 97(6) :4203-4214. 62
- SCIAVICCO, L. ET SICILIANO, B. 2005. Modeling and control of manipulators. 12

- SHADLEN, M. ET NEWSOME, W. 1996. Motion perception : seeing and deciding. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(2) :628-633. 105
- SHADLEN, M. ET NEWSOME, W. 2001. Neural basis of a perceptual decision in the parietal cortex (area lip) of the rhesus monkey. *Journal of Neurophysiology*, 86(4) :1916-1936. 104, 105
- SHADMEHR, R. ET WISE, S. 2005. *The Computational Neurobiology of Reaching and Pointing : A Foundation for Motor Learning*. MIT Press. 63, 64, 65, 66, 67, 69, 74, 102, 108
- SHAFER, G. 1976. *A mathematical theory of evidence*. Princeton university press Princeton, NJ. 18
- SHERRINGTON, C. 1918. Observations on the sensual role of the proprioceptive nerve-supply of the extrinsic ocular muscles. *Brain*, 41(3-4) :332-343. 56
- SHICHINOHE, N., AKAO, T., KURKIN, S., FUKUSHIMA, J., KANEKO, C., ET FUKUSHIMA, K. 2009. Memory and decision making in the frontal cortex during visual motion processing for smooth pursuit eye movements. *Neuron*, 62(5) :717-732. 109
- SIEGEL, M., ENGEL, A., ET DONNER, T. 2011. Cortical network dynamics of perceptual decision-making in the human brain. *Frontiers in human neuroscience*, 5(21) :1-12. 104, 105
- SMITH, M. ET CRAWFORD, J. 2005. Distributed population mechanism for the 3-d oculomotor reference frame transformation. *Journal of neurophysiology*, 93 :1742-1761. 89
- SNYDER, L. 2000. Coordinate transformations for eye and arm movements in the brain. *Current OPinion Neurobiology*, 10 :747-754.. 110
- SNYDER, L., BATISTA, A., ET ANDERSEN, R. 1997. Coding of intention in the posterior parietal cortex. *Nature*, 386(6621) :167-170. 109
- SNYDER, L., GRIEVE, K., BROTCHE, P., ET ANDERSEN, R. 1998. Separate body- and world-referenced representations of visual space in parietal cortex. *Nature*, 394(6696) :887-891.. 26, 27, 30, 48, 54, 57, 58, 59, 106, 110
- SOECHTING, J. ET FLANDERS, M. 1989a. Errors in pointing are due to approximations in sensorimotor transformations. *Journal of Neurophysiology*, 62(2) :595-608. 11
- SOECHTING, J. ET FLANDERS, M. 1989b. Sensorimotor representations for pointing to targets in three-dimensional space. *Journal of Neurophysiology*, 62(2) :582-594. 11, 62
- SOECHTING, J. ET FLANDERS, M. 1992. Moving in three-dimensional space : frames of reference, vectors, and coordinate systems. *Annual Review of Neuroscience*, 15(1) :167-191. 62
- SORRENTO, G. ET HENRIQUES, D. 2008. Reference frame conversions for repeated arm movements. *Journal of Neurophysiology*, 99(6) :2968-2984. 66
- SOUÈRES, P., DJEDDOU, M., ET CADENAT, V. 2003. Dynamical sequence of multi-sensor based tasks for mobile robots navigation. *IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO'03)*, 2 :423-428. 22

- SPERRY, R. 1950. Neural basis of the spontaneous optokinetic response produced by visual inversion. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 43(6) :482-489. 56
- SPONG, M. ET VIDYASAGAR, M. 1989. *Dynamics and control of robot manipulators*. John Wiley. 63
- STEIN, J. 1989. Representation of egocentric space in the posterior parietal cortex. *Q J Exp Physiol.*, 74(5) :583-606. 5, 112
- STRICANNE, B., ANDERSEN, R., ET MAZZONI, P. 1996. Eye-centered, head-centered, and intermediate coding of remembered sound locations in lip. *Journal of neurophysiology*, 76(3) :2071-2076. 6
- SUKEMIYA, H., NAKAMIZO, S., ET ONO, H. 2008. Location of the auditory egocentre in the blind and normally sighted. *Perception*, 37(10) :1587-1595. 112
- SUN, Y. ET WANG, H. 2010. Perception of space by multiple intrinsic frames of reference. *PLoS One*, 5(5) :e10442.. 8, 9
- SUPER, H. 2006. Figure-ground activity in v1 and guidance of saccadic eye movements. *Journal of Physiology-Paris*, 100(1-3) :63-69. 110
- TAKEI, K., TAKAHASHI, T., HO, J., KO, H., GILLIES, A., LEU, P., FEARING, R., ET JAVEY, A. 2010. Nanowire active-matrix circuitry for low-voltage macroscale artificial skin. *Nature Materials*, 9 :821-826. 16
- THOMPSON, A. ET HENRIQUES, D. 2008. Updating visual memory across eye movements for ocular and arm motor control. *Journal of neurophysiology*, 100(5) :2507-2514. 66
- THORPE, S., DELORME, A., ET VANRULLEN, R. 2001. Spike-based strategies for rapid processing. *Neural Network*, 14 :715-725. 56
- THUILOT, B., MARTINET, P., CORDESSES, L., ET GALLICE, J. 2002. Position based visual servoing : Keeping the object in the field of vision. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp 1624–1629,. 71
- TILLERY, S., SOECHTING, J., ET EBNER, T. 1996. Somatosensory cortical activity in relation to arm posture : nonuniform spatial tuning. *Journal of neurophysiology*, 76, 2423-2438. 64
- TONDU, B. ET LOPEZ, P. 2000. Modeling and control of mckibben artificial muscle robot actuators. *IEEE control systems*, 20(2) :15-38. 16
- TROTTER, Y. ET CELEBRINI, S. 1999. Gaze direction controls response gain in primary visual cortex neurons. *Nature*, 398(6724) :239-242. 10, 25, 55, 106
- TROTTER, Y., CELEBRINI, S., ET AL. 1992. Modulation of neural stereoscopic processing in primate area v1 by the viewing distance. *Science*, 257(5074) : 1279-81. 10, 25, 55
- TROTTER, Y., CELEBRINI, S., ET AL. 2004. Evidence for implication of primate area v1 in neural 3-d spatial localization processing. *J Physiol Paris*, 98(1-3) : 125-34. 10, 58

- TROTTER, Y., CELEBRINI, S., STRICANNE, B., THORPE, S., ET IMBERT, M. 1996. Neural processing of stereopsis as a function of viewing distance in primate visual cortical area v1. *Journal Neurophysiology*, 76 :2872-2885. 55
- ULLOA, A. ET BULLOCK, D. 2003. A neural network simulating human reach-grasp coordination by continuous updating of vector positioning commands. *Neural Networks*, 16(8) : 1141-1160. 64, 108
- UNO, Y., KAWATO, M., ET SUZUKI, R. 1989. Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement : Minimum torque-change model. *Biol. Cybern.* 61 :89-101. 66, 81
- VAN BEERS, R., SITTING, A., ET DENIER VAN DER GON, J. 1998. The precision of proprioceptive position sense. *Exp. Brain Res.* 122 :367-377. 63
- VAN OPSTAL, A., HEPP, K., SUZUKI, Y., ET HENN, V. 1995. Influence of eye position on activity in monkey superior colliculus. *Journal of Neurophysiology*, 74(4) :1593-1610. 106
- VAN PELT, S. ET MEDENDORP, W. 2007. Gaze-centered updating of remembered visual space during active whole-body translations. *Journal of neurophysiology*, 97(2) :1209-1220. 66
- VINDRAS, P. ET VIVIANI, P. 1998. Frames of reference and control parameters in visuomanual pointing. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 24(2) :569-591. 64, 108
- VON HOLST, E. 1954. Relations between the central nervous system and the peripheral organs. *British Journal of Animal Behaviour*, 2 :89-94. 56
- WANG, X., ZHANG, M., COHEN, I., ET GOLDBERG, M. 2007. The proprioceptive representation of eye position in monkey primary somatosensory cortex. *Nat Neurosci.*, 10(5) :640-646. 10, 56, 106
- WANG, Y., CELEBRINI, S., TROTTER, Y., ET BARONE, P. 2008. Visuo-auditory interactions in the primary visual cortex of the behaving monkey : electrophysiological evidence. *BMC neuroscience*, 9 :79. 11, 56
- WATANABE, K. ET FUNAHASHI, S. 2007. Prefrontal delay-period activity reflects the decision process of a saccade direction during a free-choice odr task. *Cerebral Cortex*, 17(suppl 1) :i88-100. 108
- WERNER-REISS, U., KELLY, K., TRAUSE, A., UNDERHILL, A., ET GROH, J. 2003. Eye position affects activity in primary auditory cortex of primates. *Curr Biol.*, 13(7) :554-562. 10, 55, 118
- WEYAND, T. ET MALPELI, J. 1993. Responses of neurons in primary visual cortex are modulated by eye position. *Journal of neurophysiology*, 69(6) :2258-2260.. 10, 25
- WU, W. ET HATSOPOULOS, N. 2006. Evidence against a single coordinate system representation in the motor cortex. *Exp Brain Res.*, 175(2) :197-210. 11
- WURTZ, R. 2008. Neuronal mechanisms of visual stability. *Vision Res.*, 48(20) :2070-2089. 56

XIAO, J., PADOA-SCHIOPPA, C., ET BIZZI, E. 2006. Neuronal correlates of movement dynamics in the dorsal and ventral premotor area in the monkey. *Exp. Brain Res.*, 168, 106-119. 102, 106

XING, J. ET ANDERSEN, R. 2000. Models of the posterior parietal cortex which perform multimodal integration and represent space in several coordinate frames. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12 :4, 601-614. 85, 87

XU, Y., WANG, X., PECK, C., ET GOLDBERG, M. 2011. The time course of the tonic oculomotor proprioceptive signal in area 3a of somatosensory cortex. *Journal Neurophysiology, Articles in Press*. 57

ZHANG, M., WANG, X., ET GOLDBERG, M. 2008. Monkey primary somatosensory cortex has a proprioceptive representation of eye position. *Prog Brain Res.*, 171 :37-45. 10

ZIPSER, D. ET ANDERSEN, R. 1988. A back-propagation programmed network that stimulates response properties of a subset of posterior parietal neurons. *Nature*, 331, 679-684. 9, 55, 65, 85, 87