



**THESE DE DOCTORAT DE
L'UNIVERSITE PARIS V - RENE DESCARTES**

Ecole Doctorale Cerveau, Cognition, Comportement

Spécialité Robotique et Neurosciences

Présentée par

M. TOUVET François

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PARIS DESCARTES

Approche bioinspirée pour le contrôle des mains mécaniques

soutenue le **22 Octobre 2012**

devant le jury composé de :

M. **MAIER** Marc, Directeur de thèse

M. **ZEGHLOUL** Saïd, co - Directeur de thèse

M. **ESKIIZMIRLILER** Selim, co - Directeur de thèse

M. **GAUSSIER** Philippe, Rapporteur

M. **DOMINEY** Peter, Rapporteur

M. **SOUERES** Philippe, Examineur

M. **SAHBANI** Anis, Examineur

Résumé :

Les travaux exposés dans cette thèse sont de natures multiples mais visent tous à une meilleure compréhension du geste de saisie chez l'homme, que ce soit d'un point de vue comportemental, cinématique ou de contrôle. Lorsqu'il doit saisir un objet, l'homme s'appuie sur une structure de contrôle multi-niveaux ainsi que son expérience, ce qui lui permet d'estimer les mouvements à effectuer de manière très efficace avant même d'avoir commencé à bouger. Nous pensons que ce mode de commande peut apporter une solution innovante au double problème de l'atteinte et de la saisie par une main artificielle. Nous avons donc développé une architecture de commande distribuée reproduisant en partie ces mécanismes et capable de contrôler ce genre d'artefacts de manière efficace, déclinée en plusieurs versions en fonction du niveau de contrôle souhaité. Elle est constituée d'un ensemble d'unités d'appariement s'inspirant des structures présentes dans le Système Nerveux Central : chacune a en charge une partie du problème global à résoudre, elles intègrent des informations en provenance de la consigne et/ou d'autres unités à travers des échanges parfois redondants, et elles s'appuient sur un algorithme d'apprentissage supervisé.

Afin de mieux comprendre les principes qui sous-tendent le mouvement humain nous nous sommes aussi intéressés à la modélisation de la main et du geste de saisie, que ce soit à travers un protocole d'expérimentation chez l'homme ou l'analyse de données médicales et vidéos chez le singe.

Mots-clefs : atteinte, saisie, unités d'appariement, architecture distribuée, apprentissage supervisé homme, singe, mains artificielles

Summary:

Works presented in this thesis are of multiple kinds but all aim at a better understanding of the human grasping movements, may it be from a behavioural, kinematics or control point of view. When one wants to grasp an object he relies on a multilayer control structure and its personal experience, the two of which allow him to estimate the appropriate move in a very efficient way, even before he actually started to move. We think that this type of command can bring forth an innovative solution to the double reach and grasp problem that face an artificial hand. We developed a distributed command architecture that reproduce in part these mechanisms and is able to control this type of artefacts in an efficient way, several versions of which were implemented regarding the desired control level. It consists of a group of matching units that takes inspiration in the Central Nervous System: each of them is in charge of a part of the global problem to be solved; they integrate data from the system inputs and/or from other units in partly redundant ways; and they rely on a supervised learning algorithm.

In order to better understand the underlying principles of human movement we also took interest in hand and grasping movement models, may it be through an experimental protocol on human or monkey medical and video data analysis.

Keywords: reach, grasp, matching units, distributed architecture, supervised learning, human, monkey, artificial hands

A celle qui grimpe aux arbres, pieds nus

A celui qui marche entre les mondes

A celui qui déclame, à celle qui ne rejette pas

A celui qui croit et celle qui sait

A celui qui attend

A ceux qui jouent

A ceux qui chantent le passé, ceux qui le ressuscitent

A celui qui répond, celui qui écoute

A celui qui a la classe

A celle qui a faim

A celui qui sourit

A celui qui connaît la réponse

A celui qui fait jouer les rats

A celle qui garde

A celui qui vit

A tous ceux qui s'accrochent à leurs rêves

Je tiens à remercier le professeur Marc Maier ainsi que Selim Eskiizmirililer pour leur accueil au sein de l'équipe et nos discussions autour des différents projets ; j'ai beaucoup appris à votre contact.

Merci aussi au professeur Saïd Zegloul, à Jean-Pierre Gazeau et à l'équipe de Poitiers pour nos instants partagés autour du site expérimental et en-dehors du travail.

Merci au professeur Roger Lemon et à Alexander Kraskov pour leur enthousiasme et leur patience dans nos échanges, tant physiques que virtuels.

Je souhaite exprimer enfin une pensée particulière à Agnès Roby-Brami, qui m'a été d'un grand soutien en plusieurs occasions au cours de ces trois années.

Table des matières

Introduction.....	9
1. L'importance de la main pour l'homme	10
a) La main : proto-outil, méta-outil	10
b) La main comme interface avec le monde	14
2. Aspects traités par cette thèse.....	15
a) Plaidoyer pour le biomimétisme.	15
b) Exposé des travaux effectués	17
I. La main biologique	18
1. Données anatomiques.....	19
a) Les os	19
b) Les ligaments et tendons des muscles extrinsèques.....	21
c) Les muscles.....	24
d) Modèle géométrique/cinématique.....	27
2. Contrôle du mouvement volontaire.....	29
a) Synergies	29
b) Le mouvement est une relation sensorimotrice	29
c) Deux types de commande.....	30
d) Les circuits neuraux impliqués.	30
e) La moelle épinière : jonction neuro-musculaire et réflexes spinaux	31
f) Tronc cérébral : intégration et réflexes supraspinaux	34
g) Cortex et cerveau antérieur : planification et exécution du mouvement volontaire	34
h) Aires motrices.....	35
i) Autres structures corticales : cervelet et ganglions de la base	38
j) Relation visuo-motrice	39
k) Les processus d'apprentissage.	40
l) Planification.....	40

m)	Importance de la tâche et affordances	41
3.	Outils de compréhension et de modélisation du contrôle de la main.....	42
a)	Les taxonomies.....	42
b)	Les doigts virtuels.....	45
c)	La réduction des DDL : analyse en composantes principales.....	45
II.	Les mains mécaniques	47
1.	Etat de l'art orienté.....	48
a)	Les mains mécaniques dans la recherche : un moyen de mieux comprendre la main humaine.....	49
b)	Les mains mécaniques dans le domaine médical.....	56
2.	<i>Schémas de contrôle bio-inspirés en robotique</i>	61
a)	Le transfert humain-robot.....	61
b)	Détermination de la configuration de la main	62
c)	Exploration de l'espace solution.....	62
III.	Schéma de contrôle biomimétique tiré de la littérature comportementale	63
1.	Résumé.....	64
2.	Contexte de l'étude.....	65
a)	le projet PALOMA.....	65
b)	le projet ABILIS	68
3.	Méthodes	69
a)	Site expérimental du projet ABILIS.....	69
b)	Simulateur du site	71
c)	Une architecture de contrôle distribuée pour commander le système.....	79
d)	Adaptation à la main LMS : nouvelle architecture	85
e)	Sous-système dédié à la Saisie (Grasp Subsystem)	96
f)	Sous-système dédié à la pré-conformation (Preshape Sub-system).....	99
4.	Résultats	100
a.	Apprentissage des Unités d'Appariement.....	100
b.	Evaluation de l'erreur du simulateur	102
c.	Validation sur site expérimental	104

g)	Validation des différents objets	105
h)	Validation des différentes positions et orientations.....	107
5.	Conclusions et Discussion.....	109
a.	Etude comparée avec d'autres approches similaires.....	109
b.	Atteinte.....	110
c.	Saisie.....	111
d.	Vers une saisie « naturelle ».....	111
IV.	Etude des synergies de préhension chez le sujet sain.....	112
1.	Résumé.....	113
2.	Méthodes : modèle anatomique générique de la main humaine.	114
a)	Relations intra-digitales.....	115
b)	Relations inter-digitales.....	117
c)	Mesures anthropométriques générales.....	118
d)	Généralisation	119
3.	Méthodes : mesures des mouvements de préhension.....	122
a)	Sujets.....	122
b)	Consignes.....	122
c)	Principe.....	123
d)	Objets	124
e)	Etalonnage et Mesures.....	125
f)	Préparation de l'expérience	125
g)	Déroulement de l'expérience.....	128
4.	Méthodes : nouvelles architectures de contrôle.	130
a)	Atteinte.....	131
b)	Saisie.....	131
5.	Résultats	134
a)	Constitution de la base.....	134
b)	Analyse de l'Atteinte	135
c)	Analyse de la Saisie.....	141

d)	Données comportementales	145
6.	Discussion	147
a)	Les points de dépose comme équivalents aux points de prise	147
b)	Les points-cibles centrés sur l'épaule.....	147
V.	Modélisation du geste de saisie chez le singe à partir de vidéos.....	148
1.	Résumé	149
2.	Méthodes : Analyse des données vidéo et reconstruction 3d.....	150
a)	Principes de la reconstruction 3d.....	150
b)	Site expérimental et système d'acquisition	161
c)	Etalonnage du système.	163
d)	Traitement des données vidéo.....	165
3.	Méthodes : Modèle anatomique	173
a)	Faisabilité : premier simulateur avec une main humaine	173
b)	Méthode de reconstruction	174
4.	<i>Résultats</i>	179
a)	Extraction de configurations de prise des vidéos.....	179
b)	Estimation des points manquants.....	182
c)	Extraction des angles articulaires.....	183
5.	Conclusions et discussion	188
a)	Suppression des occultations	188
b)	Ajustement au modèle virtuel.....	188
VI.	Discussion et conclusions.....	190
1.	Schéma de contrôle biomimétique tiré de la littérature comportementale	191
2.	Etude des synergies de préhension chez le sujet sain	192
3.	Modélisation du geste de saisie chez le singe à partir de vidéos.....	193
VII.	Annexes	194
1.	Modèle géométrique du robot Kuka KR16.....	195
2.	Modèle géométrique de la main LMS	198
a)	Modèle d'un doigt long	199
b)	Modèle du pouce	200

3.	Validation expérimentale des prises générées par l'architecture de contrôle ABILIS	202
4.	Documents relatifs à l'expérimentation « Synergies de Préhension chez le Sujet Sains »	208
5.	Résultats de la reconstruction des configurations de prise à partir d'acquisitions vidéo	215
Bibliographie.....		219

Introduction

1. L'importance de la main pour l'homme

Tous les jours nous utilisons nos mains pour effectuer des actions complexes parfois sans même y penser : attraper des objets, les manipuler, ou simplement les toucher. L'homme est un animal qui agit, mais son action requiert l'intégration de ce qu'il peut voir, de ce qu'il peut toucher. En cela la main est aussi fondamentale que l'œil voire plus, car elle permet à la fois d'agir sur le monde et de le percevoir.

a) La main : proto-outil, méta-outil

La main est souvent décrite comme le premier et le plus raffiné des outils dont l'homme dispose. Le terme d'outil utilisé ici n'est pas anodin, et loin de la distinction entre ce qui appartient au corps et ce qui en est détaché il faut bien voir la main comme ce qu'elle est : un organe permettant d'intégrer le monde à sa corporalité. Attaché au reste du corps à travers la main, n'importe quel objet de n'importe quelle forme s'y intègre et devient le nouvel organe terminal, le nouvel outil (Maravita et Iriki 2004).

On a souvent opposé l'homme aux animaux lorsque l'on parle de l'utilisation d'outils (Alain, Bourg 1997). S'il est vrai que nous passons le plus clair de notre temps à tenir quelque chose en main, à nous servir de quelque chose, il n'en est pas moins faux que nous sommes les seuls dans le règne animal à le faire. Si l'on exclue les animaux n'appartenant pas à l'ordre des primates (corbeaux, éléphants, vautours, loutres...) on pourra citer comme exemple le chimpanzé (Yamagiwa, et al. 1988, Sanz et Morgan 2009) et son utilisation de brindilles pour « pêcher » des fourmis rouges particulièrement virulentes ou récolter du miel, ou encore celle qu'il fait de pierres en combinaison « marteau-enclume » ; cette pratique est à considérer avec une attention particulière car relevant d'une véritable coutume transmise de génération en génération, les sites de cassage étant parfois utilisés depuis plus de deux cents ans (Fagard 2001) ; la distinction entre l'homme et l'animal ne tient finalement qu'à un facteur d'échelle.

Aristote (et de nombreux autres ayant marché dans ses traces) a défini la main comme l'outil parfait de par sa *polyvalence* et sa *complexité* (voir Encadré 0-1). Si on laisse de côté cette dernière caractéristique purement attachée à l'évolution de notre espèce pour le moment (on pourra en avoir un aperçu dans le chapitre I), il n'en est pas moins vrai que l'outil-main possède un potentiel très grand, que ce soit pour sa conformation autour d'objets très variés, la gamme de forces qu'il peut appliquer ou encore la finesse des capteurs dont il est équipé ; aujourd'hui aucun système artificiel ne peut rivaliser avec lui sur ce dernier point. Cependant il ne faut pas oublier que la plupart des objets saisis par l'homme ont été façonnés ou adaptés par lui ; combien peut-on aujourd'hui dénombrer d'objets dans notre vie quotidienne qui ne soient pas le fruit de cette adaptation bilatérale ?

Encadré 0-1. Aristote : la main, un outil (Aristote.)

« Ce n'est pas parce qu'il a des mains que l'homme est le plus intelligent des êtres, mais c'est parce qu'il est le plus intelligent qu'il a des mains. En effet, l'être le plus intelligent est celui qui est capable de bien utiliser le plus grand nombre d'outils : or, la main semble bien être non pas un outil, mais plusieurs. Car elle est pour ainsi dire un outil qui tient lieu des autres. C'est donc à l'être capable d'acquiescer le plus grand nombre de techniques que la nature a donné l'outil de loin le plus utile, la main. Aussi, ceux qui disent que l'homme n'est pas bien constitué et qu'il est le moins bien partagé des animaux (parce que, dit-on, il est sans chaussures, il est nu et n'a pas d'armes pour combattre), sont dans l'erreur. Car les autres animaux n'ont chacun qu'un seul moyen de défense et il ne leur est pas possible de le changer pour un autre, mais ils sont forcés, pour ainsi dire, de garder leurs chaussures pour dormir et pour faire n'importe quoi d'autre, et ne doivent jamais déposer l'armure qu'ils ont autour de leur corps ni changer l'arme qu'ils ont reçue en partage. L'homme — au contraire — possède de nombreux moyens de défense, et il lui est toujours loisible d'en changer et même d'avoir l'arme qu'il veut et quand il le veut. Car la main devient griffe, serre, corne, ou lance ou épée ou toute autre arme ou outil. Elle peut être tout cela parce qu'elle est capable de tout saisir et de tout tenir.

La forme même que la nature a imaginée pour la main est adaptée à cette fonction ».

Si l'on sort de ces sentiers, tracés par l'homme et pour l'homme, on se retrouve hors des frontières de nos capacités physiques et confrontés à des problèmes dont la résolution passera par la technique : ainsi sont nés les outils, simples prolongements du corps de l'homme et de sa main-outil. De par son rôle d'interface l'outil lui permet d'explorer le monde en devenant l'objet des menaces qui jusque là pesaient sur ses mains nues (Encadré 0-2). La polyvalence de la main passe désormais au second plan puisqu'elle se transforme en support pour le nouvel organe terminal, en s'adaptant aux contraintes fixées par celui-ci et la tâche à accomplir. L'action de saisie n'est rien d'autre que la fermeture de la chaîne cinématique multiple constituée par le pouce et les autres doigts, avec le transfert du point terminal à l'objet saisi. On peut donc parler de « segment virtuel » constitué d'une partie de l'objet et qui viendrait s'ajouter aux segments naturels (phalanges, paume, avant-bras et bras) afin d'effectuer une tâche que permet l'objet. Ce phénomène d'intégration peut se traduire par la sensation de « peuplement » d'un objet lors de son utilisation, prolongeant le corps de la personne qui l'utilise d'un point de vue moteur comme sensoriel (voir Figure 0-1). L'homme réinvente ainsi en permanence son espace (péri)personnel et devient tour à tour machine à porter, taper, peindre ou jouer du piano.

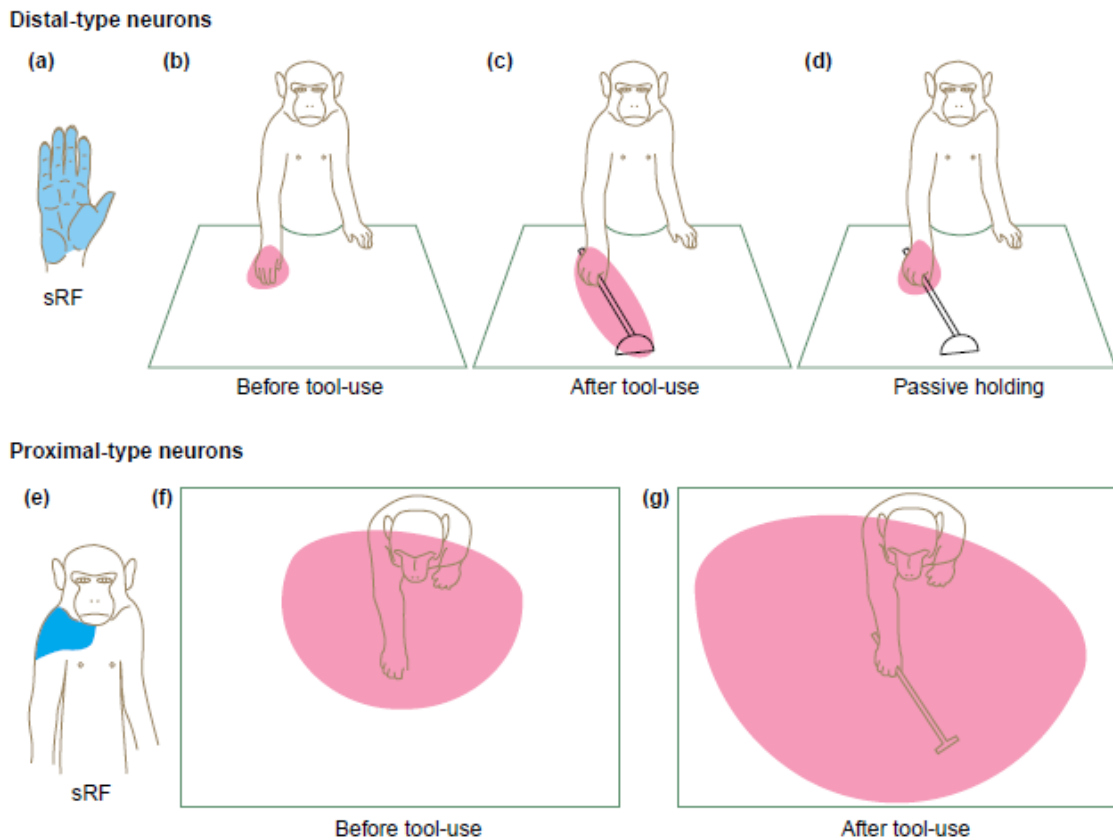


Figure 0-1. Les champs récepteurs de neurones bimodaux situés dans le cortex intrapariétal du singe modifient leur géométrie afin d'y intégrer un outil (Maravita et Iriki 2004). Ces neurones peuvent être classés suivant qu'ils réagissent à des stimuli au niveau de la main (type distal, ligne supérieure) ou de segments plus près du centre du corps (type proximal, ligne inférieure). a) et e) Les champs récepteurs somatosensoriels (sRF, en bleu) des deux populations de neurones examinées. b) et f) Les champs récepteurs visuels (vRF, en rose) de ces mêmes deux populations, avant l'apprentissage de l'utilisation de l'outil c) et g) les mêmes champs récepteurs après un apprentissage de deux semaines ; leur domaine de réaction englobe désormais « l'espace de travail » du râteau. d) Si l'outil est tenu de manière passive, c'est-à-dire qu'il ne prend pas de part active à la tâche, les champs récepteurs visuels ne sont que peu modifiés.

Encadré 0-2. Alain : la puissance de l'outil (Alain)

« L'outil est quelque chose qui résiste, et qui impose sa forme à la fois à l'action et à la chose faite. Par la seule faux, l'art de faucher est transmis du père à l'enfant. L'arc veut une position des bras et de tout le corps, et ne cède point. La scie de même ; les dents de fer modèrent l'effort et règlent le mouvement ; c'est tout à fait autre chose que de ronger. Tel est le premier aspect de l'outil. J'en aperçois un autre, qui est que l'outil est comme une armure. Car le corps vivant est aisément meurtri, et la douleur détourne ; au lieu que l'outil oppose solide à solide, ce qui fait que le jeu des muscles perce enfin le bois, la roche, et le fer même. Le lion mord vainement l'épieu, le javelot, la flèche. Ainsi l'homme n'est plus à corps perdu dans ses actions mais il envoie l'outil à la découverte. Si le rocher en basculant retient la pioche ou le pic, ce n'est pas comme s'il serrait la main ou le bras. L'homme se retrouve intact, et la faute n'est point sans remède. D'où un genre de prudence où il n'y a point de peur. On comprend d'après ces remarques la puissance de l'outil. »

Etant conscient de ces frontières il devient alors logique de ne plus considérer la main en tant qu'outil parfait, car si c'était le cas nous n'aurions besoin de rien de plus afin de manipuler ce qui nous entoure, quelle que soit la tâche ou l'objet à saisir. Parmi la communauté roboticienne il n'est pas rare d'entendre la phrase « mais pourquoi s'embêter à vouloir copier la main humaine ? Les préhenseurs font déjà tout ça depuis longtemps. » C'est on ne peut plus vrai ; il suffit de se rendre dans une usine et d'observer le travail des robots industriels lors de la phase d'assemblage d'une pièce de voiture pour se rendre compte à quel point nous, hommes, sommes loin du compte. Mais encore une fois intervient la polyvalence de la main humaine : pour accomplir les tâches pour lesquelles ils sont programmés, ces robots doivent utiliser plusieurs types d'outils et parfois en changer plusieurs fois dans un seul cycle (Figure 0-2, D). Aujourd'hui quel robot est capable de saisir rapidement, de manière efficace et surtout *avec un seul et même organe terminal* ne serait-ce que la moitié des objets que nous manipulons quotidiennement ? Il n'existe pour le moment qu'un seul contreexemple et il n'a aucune inspiration dans le vivant (Figure 0-2, A B et C).

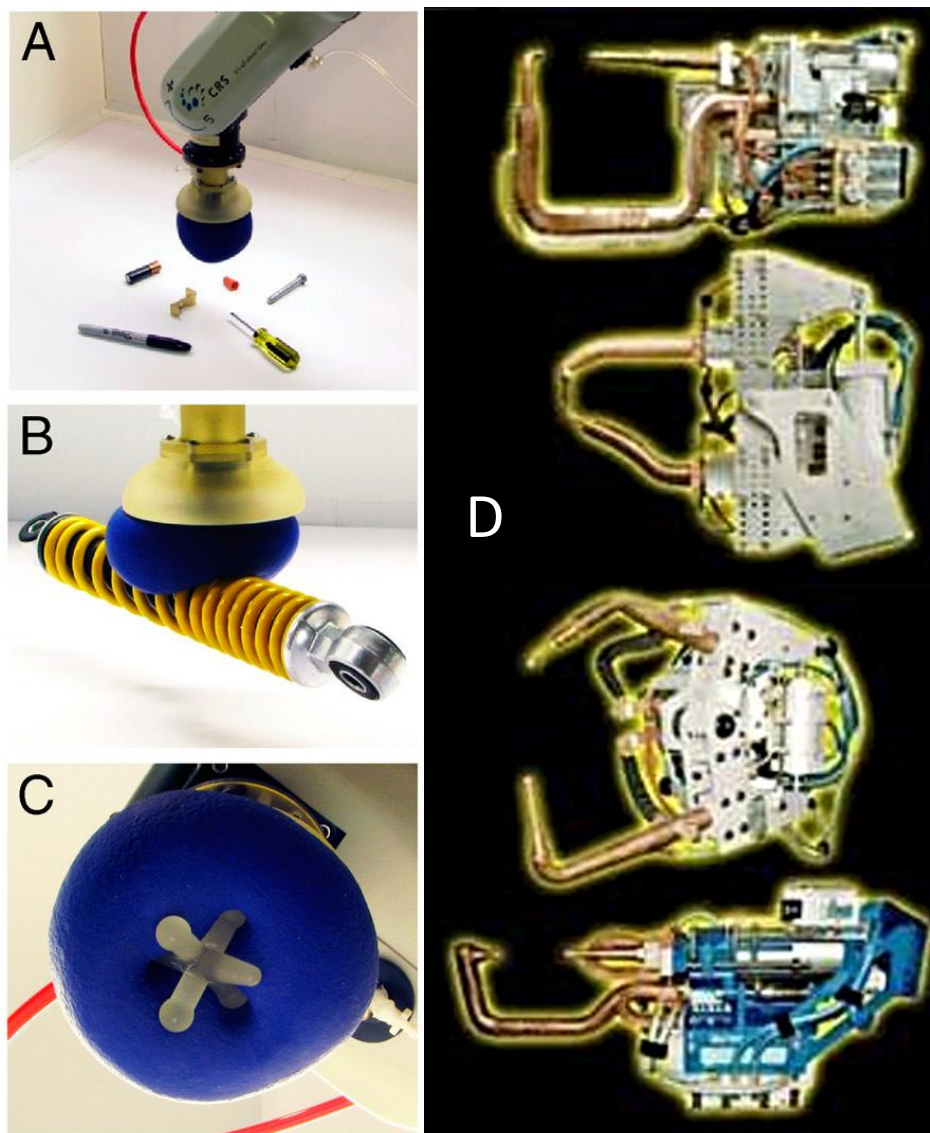


Figure 0-2. Deux types d'outil embarqué présentant des approches à la tâche diamétralement opposées : la polyvalence pour l'un (vues A, B et C) où un système très compliant s'appuie sur le principe de granularité pour s'adapter à n'importe quel objet et le « saisir » (Brown, et al. 2010) ; l'ultra-spécialisation pour l'autre (vue D) où quatre outils différents réalisent la même tâche de soudage par point avec une géométrie différente en fonction de l'endroit à atteindre pour souder la pièce (Serra).

b) La main comme interface avec le monde

Parmi les organes directement dédiés aux sens, la main est (avec les yeux) celui qui permet le plus facilement de modifier et d'orienter notre espace péripersonnel. Cet espace est à l'interface entre les espaces personnel et extrapersonnel, qui sont respectivement des représentations internes de ce qu'on considère comme appartenant à notre corps ou non. Il peut se représenter par une sorte de halo autour du corps (voir Figure 0-1), directement lié à ce que nous percevons du monde extérieur comme « atteignable » ou « influençable », que ce soit au contact direct d'une partie de notre corps ou par sa projection via un outil ; de par la disposition anatomique de nos mains il est plus étendu vers l'avant du corps que vers l'arrière et les côtés, ce qui le fait ressembler à un œuf plutôt qu'à une sphère régulière.

Il s'intègre à l'espace personnel tel que défini par Hall dans sa théorie de la proxémique (Hall 1990) : un espace dans lequel on autorise les échanges avec les personnes que l'on connaît, à mi chemin entre la zone d'intimité et la zone publique. Le fait que les limites de ces deux espaces (personnel et péripersonnel) coïncident est directement lié à la main, puisque c'est elle qui va porter au plus loin du corps une partie de son influence, modifiant ainsi la géométrie du schéma corporel (Brozzoli, et al. 2009, Cardinali, et al. 2009).

Outre ses capacités d'action sur l'espace extrapersonnel, la main va aussi servir à explorer cet espace. Cette « exploration haptique » va prendre une importance particulière dans le processus de saisie, où la main va compléter les informations estimées par le système visuel au moment du contact. Si ce système est défaillant (aveuglement temporaire ou permanent) la main va à elle seule permettre d'appréhender l'objet, et s'il est connu du sujet son identification se fera en l'espace de quelques secondes seulement (Klatzky, Lederman et Metzger 1985). Cette exploration peut passer par la palpation, le soulèvement ou encore la poussée de l'objet sur la surface qui le soutient (Thakur, Bastian et Hsiao 2008), autant de méthodes qui vont permettre au sujet d'extraire des informations qui « lui diront quelque chose » sur l'objet, que ce soit sa géométrie, sa masse, son inertie, sa texture... et qui ont été utilisées pendant la période d'apprentissage pour construire la représentation de l'objet.

2. Aspects traités par cette thèse

a) Plaidoyer pour le biomimétisme.

Le biomimétisme se traduit par la volonté de copier et /ou adapter le vivant à un problème/système artificiel. Il intervient à plusieurs niveaux : *physique* d'abord, où l'on va tenter de reproduire au mieux une structure existant dans la nature, que ce soit au niveau des effecteurs ou des organes de commande; mais aussi *contrôle*, où cette fois ce sera le comportement qui sera inspiré de la biologie. De manière surprenante, la copie de tout ou partie d'un système biologique ne sera pas une fin en soi ; bien souvent, le robot va aussi permettre de mieux comprendre le système qu'il imite (Valero-Cuevas 2000, Gaussier et Zrehen 1995, Lagarde, et al. 2010, Eskiizmirliler, Forestier, et al. 2002, Eskiizmirliler, Maier, et al. 2006, Schweighofer, Arbib et Dominey 1996, Zollo, Guglielmelli, et al. 2005) (voir Figure 0-3).

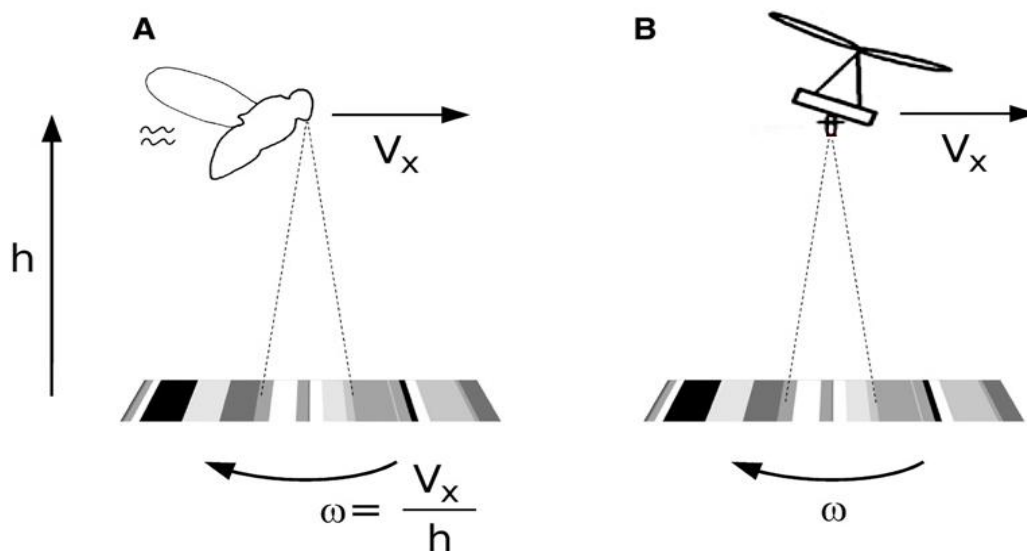


Figure 0-3. Des études sur les abeilles ont montré qu'elles utilisent le flux optique pour naviguer dans l'espace. L'implémentation de ce principe sur un robot volant a permis de mettre en évidence le fait que cette information seule permettait d'assurer un vol stable, mais aussi de moduler sa hauteur au sol et d'atterrir sans difficulté. Adapté de (Franceschini, Ruffier et Serres 2007)

La difficulté de résolution d'un problème de saisie n'est pas tant du à la complexité de l' « outil main » qu'à la manière dont on essaie de le faire fonctionner ; même si les mécanismes neuraux permettant son contrôle et les variables sur lesquelles celui-ci s'appuie sont toujours sujets à débat (cf chapitre) il est clair que le Système Nerveux Central (SNC) passe par une simplification, une abstraction de la tâche pour pouvoir l'effectuer, et qu'il ne détermine pas chaque variable impliquée à chaque instant. Un geste aussi simple que celui d'attraper un objet sur une table est le résultat d'un apprentissage effectué sur la durée et qui est en perpétuel ajustement en fonction de nouvelles situations, de nouvelles contraintes. A travers le biomimétisme nous pouvons profiter de ces années d'apprentissage pour reproduire un résultat que nous savons efficace et optimal ; la solution est sous nos yeux, il nous reste à en déduire les paramètres nécessaires à sa mise en place.

De nombreuses études sur le singe ont permis d'établir ce genre de modèle, où l'on intègre le fonctionnement de structures cérébrales dans le schéma de commande d'un robot (Oztop et Arbib, 2002, Oztop, Bradley et Arbib 2004, Ouanezar, Eskiizmirliler et Maier 2011). Ces schémas sont en grande partie transférables à l'homme, et peuvent servir de base à l'étude de caractéristiques plus complexes du geste humain comme l'intégration de la gravité dans le contrôle du geste de pointage ou encore étude du geste naturel (Tagliabue et McIntyre 2011).

L'inspiration biologique passe ainsi par l'emploi d'outils statistiques d'intelligence artificielle comme organes de contrôle, lesquels vont pouvoir par exemple apprendre à mettre en relation les données sensorielles et les consignes motrices qui leur correspondent grâce à l'utilisation de bases de données tirées du vivant, reproduisant ainsi les boucles sensorimotrices présentes dans le SNC (Figure 0-4).

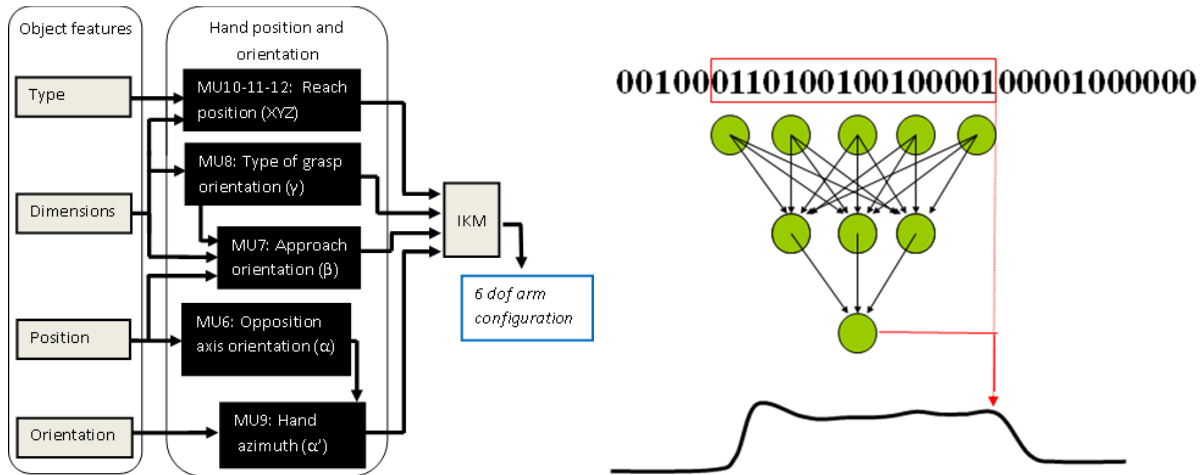


Figure 0-4. Deux types d'outils de contrôle biomimétiques : une approche par apprentissage statistique pour générer une consigne cartésienne (Touvet, et al. 2011), et une autre utilisant un réseau de neurones pour reproduire une consigne motrice à partir de signaux corticaux (Ouanezar, Eskiizmirliler et Maier 2011)

Enfin, le meilleur outil pour appliquer ce type de contrôle sera bien entendu un système artificiel reproduisant au mieux ce qui est sensé être contrôlé. Cela entraîne parfois le développement de solutions innovantes à un problème que l'on pensait résolu depuis longtemps, comme l'utilisation de tendons artificiels, ou encore de muscles pneumatiques à la place de moteurs classiques (voir Figure 0-5).



Figure 0-5. Exemples de mains artificielles dédiées à la recherche (a et b) ou la prothétique (c et d). a) LMS Hand (Gazeau, et al. 2002) b) GIFU Hand III (Tetsuya, et al. 2002) ; c) Otto Bock Sensorhand Speed (OttoBock, SensorHand Speed datasheet 2012) ; d) the BeBionic myoelectric hand (BeBionic 2012).

Le biomimétisme est un parti-pris, car parfois la solution « naturelle » n'est ni la meilleure ni la plus simple ; il peut même parfois être dérangent, comme lorsqu'il tombe au fond de la « Vallée de l'étrange » dessinée par Mori (Mori, MacDorman et Minato 1970). Cependant il permet d'élargir encore un peu plus notre compréhension de l'homme et de la nature, et en cela a largement sa place en tant qu'axe de recherche. Comme énoncé dans (Biagiotti, et al. 2002), « l'anthropomorphisme est digne d'intérêt dans le développement d'outils robotiques [de préhension et de manipulation] en ce qu'il permet d'opérer dans un environnement créé pour l'homme [...] en utilisant des objets ou des outils dont la taille et la forme ont été pensées selon les nécessités humaines, [et] facilite la téléopération du robot par l'homme », ainsi que l'interaction homme-machine à tous points de vue (Walters, et al. 2009).

b) Exposé des travaux effectués

De manière générale, les lois de commande utilisées en robotique s'appuient sur des critères à optimiser et cherchent à contrôler un maximum de variables. Il faut alors déterminer une solution, idéalement la meilleure, parmi un très grand nombre de configurations possibles. Aussi souple qu'elle puisse être cette exploration peut prendre du temps si elle est effectuée à chaque fois que l'on souhaite commander la main. Lors des travaux exposés dans cette thèse de doctorat nous avons traité le problème dans l'autre sens : l'observation de l'humain nous donne une solution, qui ne sera peut-être pas la meilleure au sens des critères évoqués ci-dessus mais dont nous sommes sûrs de la validité puisqu'elle est reproduite de nombreuses fois par les sujets, quotidiennement.

Les travaux exposés dans ce manuscrit ont tous pour point commun qu'ils partent du vivant, que ce soit pour le contrôle d'une main artificielle (chapitres III et IV) ou encore l'étude des mécanismes neuraux de la saisie chez le singe (chapitre V). Ces travaux ont des finalités différentes mais participent tous d'une meilleure compréhension des modes de fonctionnement du vivant.

Le chapitre I présente la main biologique, sa structure mécanique et les différents niveaux de son contrôle. Nous verrons ainsi toute la complexité de ce formidable outil.

Le chapitre II présente lui un état de l'art des mains robotisées utilisées actuellement, en mettant l'accent sur leur proximité du modèle biologique.

Le chapitre III expose un schéma de contrôle bio-inspiré, où les informations relatives à un objet nous permettent de guider une main robotisée embarquée sur un robot porteur afin d'aller le saisir. Ce schéma s'appuie sur des lois heuristiques déduites de la littérature comportementale chez l'homme, apprises par une architecture de contrôle constituée de sous-unités spécialisées.

Le chapitre IV constitue une extension du précédent, en ce qu'il utilise cette fois des mesures effectuées chez le sujet sain comme base d'apprentissage à une nouvelle architecture de contrôle. Il présente le protocole qui a été utilisé pour réaliser ces mesures et les comportements qui en ont émergé, tant du point de vue de l'atteinte que de la saisie.

Le chapitre V expose une méthode de reconstruction du mouvement de saisie chez le singe à partir de données vidéo seules. Il vient compléter les chapitres III et IV en apportant un aspect plus « bas-niveau » à ces études comportementales.

Enfin, le chapitre VI discute ces résultats et conclue ce manuscrit.

I. La main biologique

Cette partie présente de manière synthétique l'anatomie de la main humaine, son contrôle par le Système Nerveux Central (SNC) et les différents outils développés pour sa modélisation dans la littérature comportementaliste.

1. Données anatomiques

a) Les os.

La main humaine compte en tout 27 segments osseux, qui peuvent être répartis en six groupes (Figure I-1) : le premier comprend les huit os du poignet (ou carpe), réunis en grappe dans une gangue ligamenteuse attachée à l'avant-bras et permettant les mouvements de flexion-extension et abduction-adduction de la main à travers une relation interosseuse complexe ; le second est constitué par la colonne du pouce, ses deux phalanges son os métacarpien, relié au poignet au niveau du trapèze ; les quatre autres forment les doigts longs avec chacun trois phalanges et un os métacarpien contenu dans le corps de la paume. On peut également trouver de petits os satellites (nommés « sésamoïdes ») au niveau des articulations métacarpiennes, de manière systématique pour celle du pouce et plus aléatoire pour les autres doigts ; considérant la nature accessoire de ces os dans l'organisation et la fonctionnalité de la main nous ne les ferons pas figurer dans cette étude. Les os métacarpiens forment le corps de la paume et jouent un grand rôle en tant que soutien de la main entière.

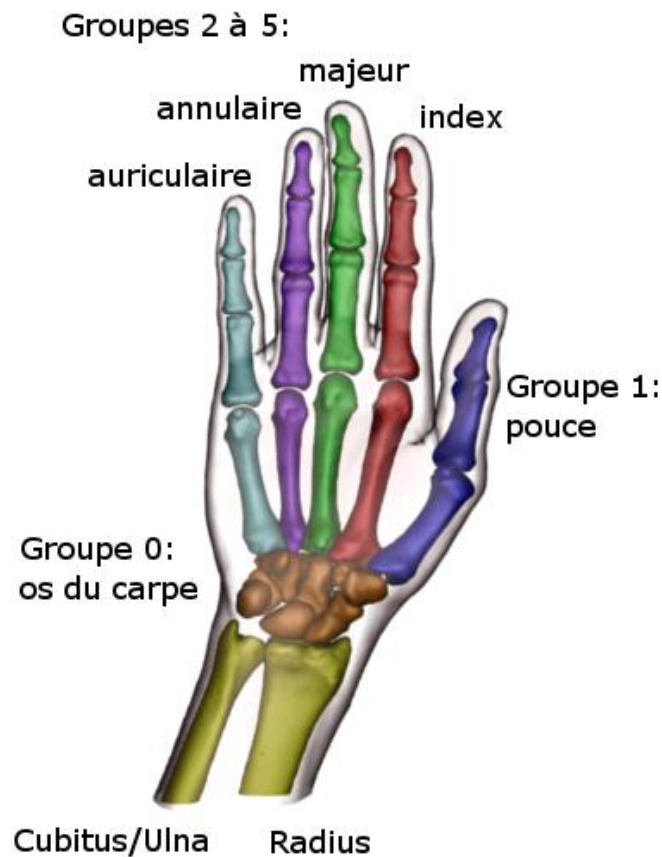


Figure I-1. Les os de la main répartis en six groupes.

On définira aussi les différentes articulations en fonction des segments entre lesquels elles font lien (Figure I-2), à savoir :

- Carpo-Métacarpienne (CMC)
- Métacarpo-Phalangienne (MCP)
- Inter-Phalangienne proximale (IPP)
- Inter-Phalangienne distale (IPD) pour les doigts longs ; et
- Scaphoïdo-Trapézienne (ST)
- Trapezo-Métacarpienne (TM)
- Métacarpo-Phalangienne (MP)
- Inter-Phalangienne distale (IPD) pour le pouce.

On remarquera la distinction faite entre l'articulation Métacarpo-Phalangienne du pouce (MP) et celle des autres doigts (MCP) car si elles sont toutes placées au même endroit dans chaque chaîne cinématique le pouce dispose d'une plus grande mobilité que les doigts longs (voir section 1, d, ii).

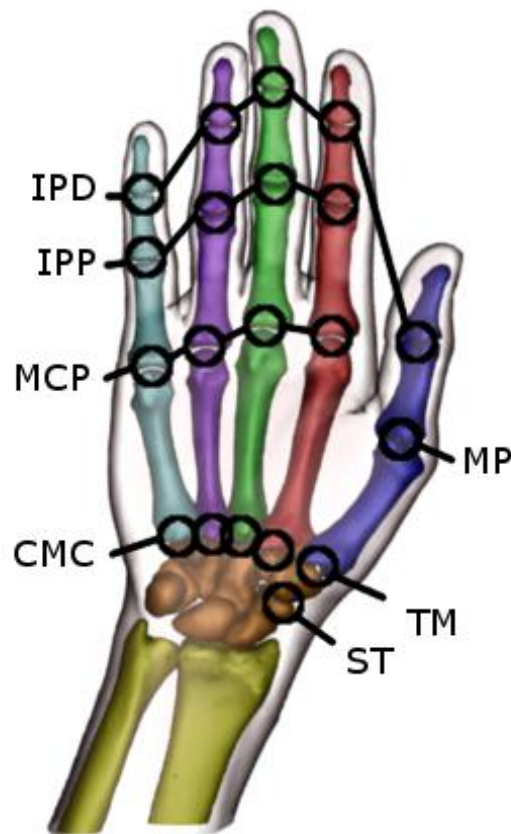


Figure I-2. Les différentes articulations des doigts.

Cette structure sert de point d'ancrage aux normes anatomiques qui permettent de décrire les différentes parties de la main ainsi que ses mouvements ; comme pour le reste du corps on parlera des plans sagittal, frontal et transversal donnés par la position anatomique de référence (Figure I-3). Cependant en tant qu'organe terminal la main agit dans son repère propre ; l'axe définissant l'abduction-adduction a été défini comme étant celui du troisième doigt (le majeur) (Kapandji 2007), ceci étant renforcé par le fait que lors des mouvements d'écartement ou de rapprochement des doigts le majeur reste naturellement immobile (ce qui ne signifie pas pour autant qu'il ne peut effectuer ce type de mouvements). De même, le centre de saisie d'un objet sphérique ou cylindrique se trouvera sur la normale à cet axe, centrée approximativement sur l'articulation MCP du majeur. Ce point, obtenu en plaçant l'extrémité des doigts en contact comme dans le geste de cuillère, est en fait le « centre outil » de la main, celui autour duquel nous évoluons lorsque nous modifions notre prise sur un objet ou l'orientation que nous donnons à celui-ci (voir chapitre III).

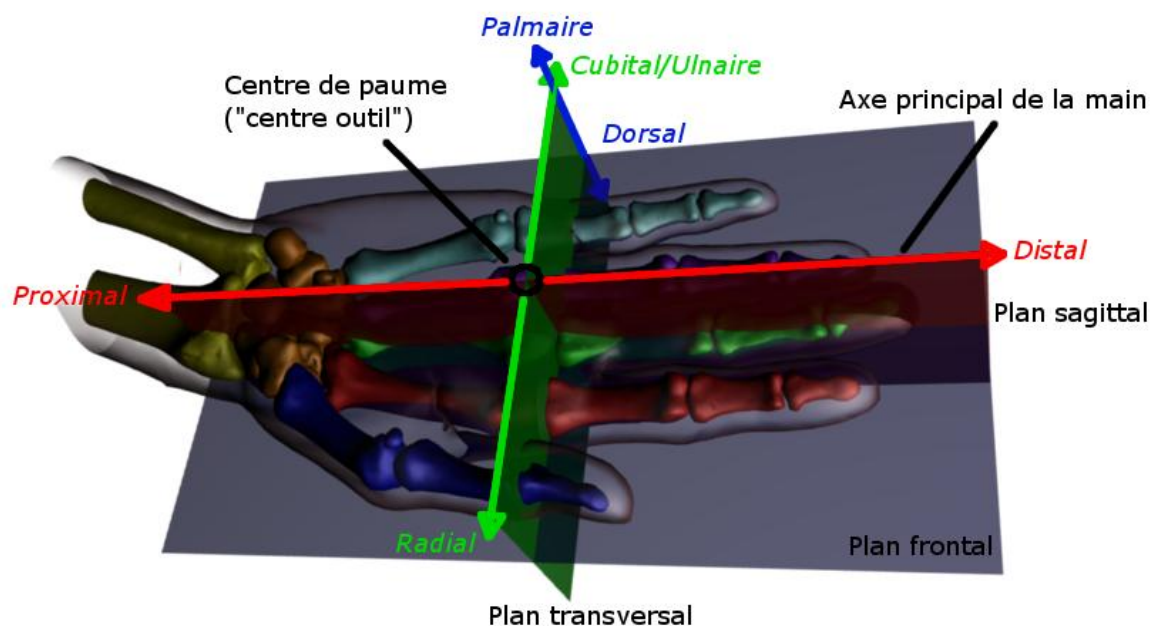


Figure I-3. Les trois axes de la main, les plans qui leur correspondent et le centre de paume.

b) Les ligaments et tendons des muscles extrinsèques.

Etant la partie du corps humain la plus sollicitée et polyvalente, la main en est aussi l'une des plus complexes au niveau structurel. C'est particulièrement visible lorsque l'on examine l'organisation de ses tendons et ligaments : chaque articulation est enserrée d'une capsule sur laquelle vont passer plusieurs ligaments assurant le contact des surfaces articulaires et limitant leurs mouvements ; ces ligaments sont parfois eux-mêmes liés entre eux de manière transverse comme c'est le cas par exemple des ligaments métacarpiens palmaires (qui permettent de rattacher entre elles les bases des os métacarpiens des doigts longs) ou du ligament transverse inter-métacarpien (qui fait de même avec les têtes) (Figure I-4).

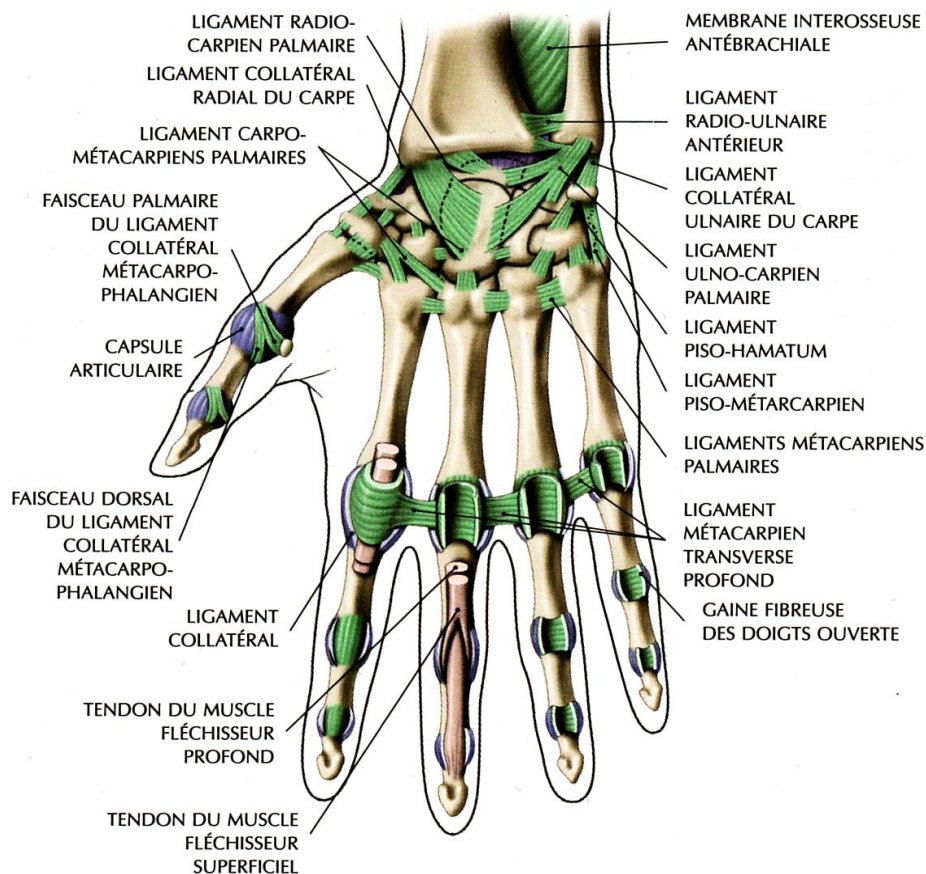


Figure I-4. L'appareil ligamenteux de la main est particulièrement complexe et intriqué (Kapandji 2007)

Ces ligaments vont constituer la base sur laquelle vont s'attacher les gaines tendineuses ainsi que les poulies fibreuses, dans lesquelles vont glisser les tendons en provenance des muscles de l'avant-bras (dits « muscles extrinsèques »). Ces tendons franchissent d'abord le poignet à travers le canal carpien, en passant sous les parties antérieure et postérieure du ligament annulaire du carpe ; antérieure pour les fléchisseurs, qui traversent ensuite la paume (Figure I-5, a), et postérieure pour les extenseurs qui eux se trouvent sur le dos de la main (Figure I-5, b).

Les tendons se répartissent ensuite sur les différents segments osseux : chaque fléchisseur passe dans les poulies jusqu'à atteindre son point d'attache final, chaque extenseur se subdivise pour agir sur un doigt entier. Cependant les choses ne sont pas aussi simples, et ici encore certaines contraintes anatomiques viennent complexifier le modèle, comme par exemple le nécessaire passage du tendon du muscle fléchisseur profond à travers celui du muscle fléchisseur superficiel au niveau de la phalange médiane (Figure I-4 et Figure I-6), ou encore le passage des muscles interosseux autour de l'articulation PIP pour passer d'extenseurs de la phalange proximale à fléchisseurs du reste du doigt en venant s'attacher sous la phalange médiane, ceci afin de gagner en puissance sans nécessaire renforcement du ligament annulaire antérieur du carpe. Il est à noter que si les tendons sont individuels ils ne représentent qu'une projection des muscles, ceux-ci contrôlant parfois plusieurs doigts à la fois.

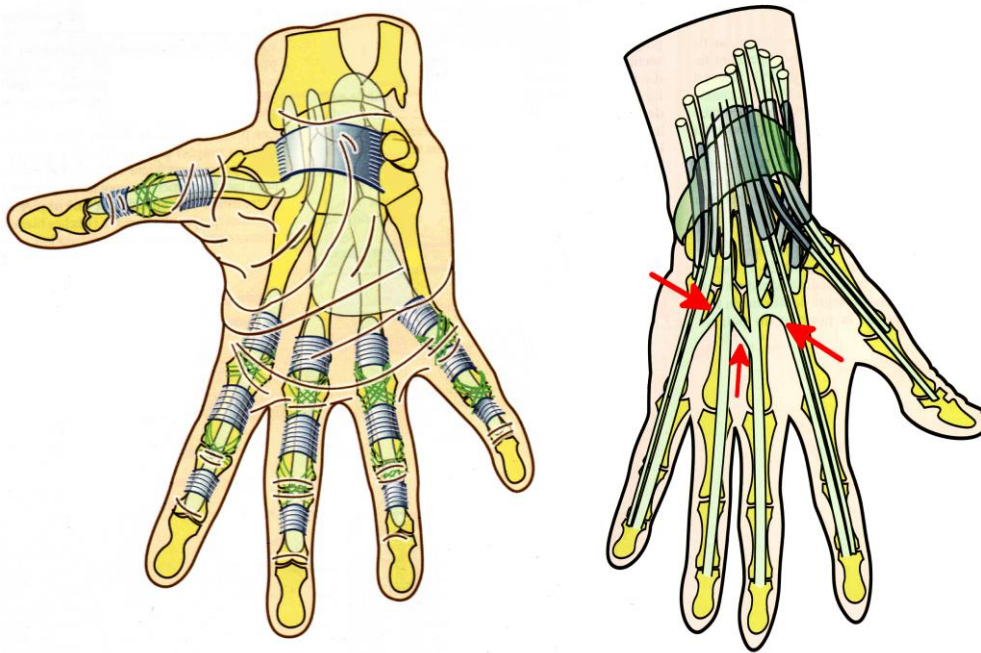


Figure 1-5. Les tendons des muscles extrinsèques passent le poignet via la gaine formée par le ligament annulaire du carpe. a) Vue palmaire : passage du poignet et insertion dans les différentes gaines des articulations. b) Vue dorsale : la répartition est ici moins différenciée. En rouge sont indiquées les bandelettes tendineuses transversales ; ces jonctions inter-tendons ont une localisation et une disposition très variables inter-individus. Elles participent nettement aux synergies de la main, reportant en partie la commande en extension d'un doigt sur ses voisins. Adapté de (Kapandji 2007)

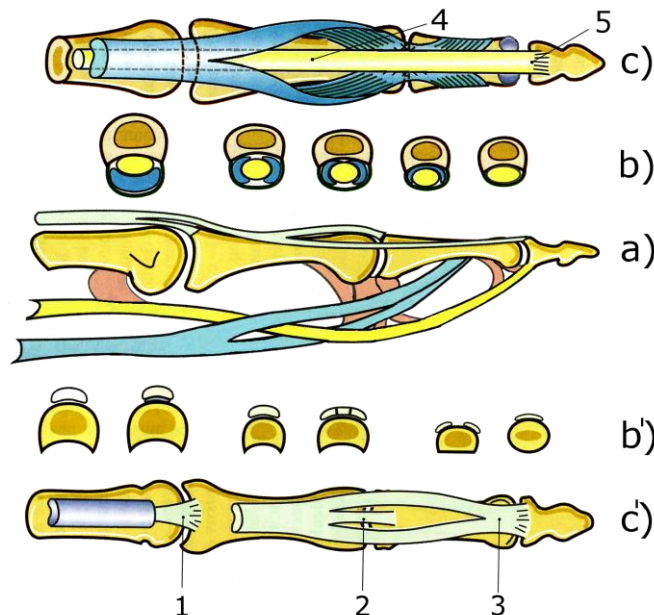


Figure 1-6. Implantation des tendons des doigts longs. a) Vue de côté, avec en vert l'extenseur commun, en bleu le fléchisseur commun superficiel, en jaune le fléchisseur commun profond et en rose les mésotendons des fléchisseurs. b) et b') Vues de face aux points d'attache et d'articulation, présentant la répartition des tendons fléchisseurs et extenseurs, respectivement. c) Vue du dessous avec le détail de l'inclusion du fléchisseur profond dans le superficiel au point 4 et son point d'attache en 5. c') Vue du dessus montrant les points d'attache de l'extenseur commun sur le doigt. Il agit principalement sur la première phalange par son expansion en 1 ; l'action des points d'attaches 2 et 3, responsables de l'extension des autres phalanges, va elle dépendre de la position du poignet (s'il est fléchi cette action sera nulle). Adapté de (Kapandji 2007)

c) **Les muscles.**

i) **Muscles extrinsèques**

Comme évoqué dans la section I.c.i, les plus puissants muscles permettant de contrôler la main se trouvent dans l'avant-bras ; ils sont dits « extrinsèques » puisqu'extérieurs à la main. Celui-ci peut se résumer grossièrement à un faisceau de fibres musculaires s'appuyant sur la structure fournie par le radius et le cubitus (ou ulna), assemblées en différents groupes entrelacés comme le seraient des tubes pneumatiques dans une gaine technique. Mis à part les muscles dédiés à la pronation-supination de l'avant-bras, chacun de ses « tubes » participe à la dextérité de la main à travers le contrôle d'un ou plusieurs de ses éléments (Kapandji 2007).

Tableau I-1. Muscles de la main. Tableau adapté de (MacKenzie et Iberall 1994, appendice A, et Kapandji 2007).

Dénomination latine	Dénomination française	Type
<i>Extensor Digitorum Longus (EDL)</i>	<i>Extenseur commun des doigts longs</i>	<i>Extrinsèque</i>
<i>Flexor Digitorum Profundus (FDP)</i>	<i>Fléchisseur profond des doigts longs</i>	<i>Extrinsèque</i>
<i>Flexor Digitorum Superficialis (FDS)</i>	<i>Fléchisseur superficiel des doigts longs</i>	<i>Extrinsèque</i>
<i>Interossei Dorsales I à IV (ID)</i>	<i>Interosseux dorsaux</i>	<i>Intrinsèque</i>
<i>Interossei Palmares I à IV (IP)</i>	<i>Interosseux palmaires</i>	<i>Intrinsèque</i>
<i>Lumbricales I à IV (L)</i>	<i>Lombriques</i>	<i>Intrinsèque</i>
<i>Extensor Indicis (EI)</i>	<i>Extenseur de l'index</i>	<i>Extrinsèque</i>
<i>Extensor Digiti Minimi (EDM)</i>	<i>Extenseur du cinquième doigt</i>	<i>Extrinsèque</i>
<i>Flexor Digiti Minimi Brevis (FDM)</i>	<i>Court fléchisseur du cinquième doigt</i>	<i>Intrinsèque</i>
<i>Adductor Digiti Minimi (ADM)</i>	<i>Adducteur du cinquième doigt</i>	<i>Intrinsèque</i>
<i>Opponens Digiti Minimi (ODM)</i>	<i>Opposant du cinquième doigt</i>	<i>Intrinsèque</i>
<i>Flexor Pollicis Longus (FPL)</i>	<i>Long fléchisseur du pouce</i>	<i>Extrinsèque</i>
<i>Extensor Pollicis Longus (EPL)</i>	<i>Long extenseur du pouce</i>	<i>Extrinsèque</i>
<i>Abductor Pollicis Longus (APL)</i>	<i>Long abducteur du pouce</i>	<i>Extrinsèque</i>
<i>Flexor Pollicis Brevis (FPB)</i>	<i>Court fléchisseur du pouce</i>	<i>Intrinsèque</i>
<i>Adductor Pollicis (AP)</i>	<i>Adducteur du pouce</i>	<i>Intrinsèque</i>
<i>Abductor Pollicis Brevis (APB)</i>	<i>Court abducteur du pouce</i>	<i>Intrinsèque</i>
<i>Opponens Pollicis (OP)</i>	<i>Opposant du pouce</i>	<i>Intrinsèque</i>

ii) **Muscles intrinsèques : interosseux et lombriques**

En plus des muscles de l'avant-bras, la main elle-même est pourvue des muscles interosseux et lombriques (dits « intrinsèques »). Ils sont situés au niveau des métacarpes des doigts longs et vont agir principalement sur les articulations MCP.

Les interosseux viennent s'insérer au niveau de la phalange proximale de chaque doigt. Ils sont au nombre de huit: quatre sur la face dorsale et quatre sur la face ventrale. Les *Interossei Dorsales* I à IV (ID, interosseux dorsaux) s'insèrent sur les métacarpiens des deux doigts qui les entourent, soit respectivement les paires pouce-index, index-majeur, majeur-annulaire et annulaire-auriculaire.

Ils provoquent l'écartement des trois doigts centraux : index, majeur et annulaire au niveau MCP, mais participent aussi à la flexion-extension de ces doigts en véritable support de l'extenseur commun (flexion sur la phalange proximale, extension sur les deux autres). Leurs tendons forment un réseau intriqué à ceux de l'extenseur commun et se projettent jusqu'à la phalange distale. Les *Interossei Palmares* I à IV (IP, interosseux palmaires) quant à eux ne viennent s'insérer que sur un des deux métacarpes, le plus distant de celui du majeur ; soit respectivement sur celui du pouce, de l'index, de l'annulaire et de l'auriculaire. Ils ont pour rôle de rapprocher les doigts en agissant sur l'articulation MCP (les mouvements de latéralité du majeur sont contrôlés par les ID II et III).

Les quatre muscles lombricaux (*Lumbricales*, L I à IV) sont les seuls du corps humain à prendre naissance sur des tendons, en l'occurrence ceux du Fléchisseur Profond (FDP). Situés au niveau des métacarpes des doigts longs dans le plan palmaire, les deux premiers lombricaux s'attachent respectivement au tendon de l'index et du majeur, alors que les deux suivants partiront à la fois des deux tendons qui les entourent, soit des couples majeur-annulaire et annulaire-auriculaire. Ils agissent principalement sur l'extension des doigts longs en facilitant le travail du FDP mais ne se contentent pas d'une influence locale sur les segments avec lesquels ils sont liés ; ils jouent un rôle essentiel dans la coordination « des extenseurs et fléchisseurs entre lesquels ils sont tendus en diagonale » (Kapandji 2007. p. 244), de par leur densité particulière en récepteurs proprioceptifs.

iii) Muscles intrinsèques : éminences thénar et hypothénar

Situés plus à la surface de la paume, d'autres muscles vont constituer les éminences thénar (base du pouce) et hypothénar (base de l'auriculaire). Ceux-ci vont être d'une double utilité puisqu'ils vont permettre à la fois un contrôle individuel des doigts auxquels ils sont dédiés et une conformation de la main autour des objets saisis par empaument (voir section 3.a) via le creusement de la paume.

Ces muscles sont au nombre de quatre pour l'éminence thénar et vont agir principalement sur l'articulation MP :

- le *Flexor Pollicis Brevis* (FPB, court fléchisseur du pouce) attire le métacarpien vers la paume en lui imprimant un mouvement de torsion ; avec l'adducteur et l'opposant du pouce il participe à la flexion de la première phalange.
- l'*Adductor Pollicis* (AP, adducteur du pouce) est un muscle très étendu puisque trouvant des points d'attache sur les métacarpiens des autres doigts et jusque sur les os du poignet ; il agit sur le métacarpien en le rapprochant de celui de l'index (fermeture de la « commissure » du pouce) et sur la première phalange (flexion).
- l'*Abductor Pollicis Brevis* (APB, court abducteur du pouce), comme le court fléchisseur, amène le pouce vers la paume et fléchit la première phalange ; cependant la direction de son action est plus extérieure (écartement du pouce par rapport à la paume).
- l'*Opponens Pollicis* (OP, opposant du pouce) a pour principale action de faire tourner la colonne du pouce sur son axe longitudinal tout en le ramenant vers la paume ; c'est lui permet réellement d'opposer l'extrémité du pouce à celle des autres doigts, d'où son nom.

Et trois pour l'éminence hypothénar :

- le *Flexor Digiti Minimi Brevis* (FDM, court fléchisseur du cinquième doigt) a une action double, combinée avec l'*Adductor Digiti Minimi*; ces deux muscles participent à la flexion de la première phalange ainsi qu'à son écartement par rapport à l'axe de la main.
- l'*Adductor Digiti Minimi* (ADM, adducteur du cinquième doigt), en plus de l'action précisée ci-dessus, se comporte comme un interosseux dorsal puisque de par ses projections tendineuses il est fléchisseur de la première phalange et extenseur des deux autres.
- l'*Opponens Digiti Minimi* (ODM, opposant du cinquième doigt) imprime un mouvement de flexion au niveau du MCP de l'auriculaire suivant un axe oblique le ramenant vers l'intérieur de la paume, en même temps qu'une torsion ; ces deux mouvements combinés permettent l'opposition franche avec le pouce.

En résumé l'éminence hypothénar permet la conformation de la main sur les objets à empaumer et augmente l'espace de travail des deux derniers doigts.

D'un point de vue robotique, son intégration reste anecdotique car très difficile tant que l'on considère la paume comme une base fixe pour les doigts ; les métacarpes qui composent la paume n'ont certes pas beaucoup de débattement angulaire mais pourtant sont constamment sollicités dans la conformation de la main aux objets. La plupart des projets compensent l'absence de l'auriculaire et de l'hypothénar par un surdéveloppement de l'abduction (soit en utilisation, soit en débattement, voire les deux) des autres doigts longs.

iv) Importance de l'auriculaire

Comme l'index, l'auriculaire dispose d'un extenseur propre en plus de l'extenseur commun, ainsi que d'un fléchisseur dans l'hypothénar. Sa puissance musculaire n'est pas plus développée que celle des autres doigts mais elle est bien plus dédiée à la « fermeture » de la main sur elle-même (comprendre : vers son centre).

Le petit doigt nous sert

- d'appui pour réaliser des tâches de dépose précise en réduisant la chaîne cinématique mise en jeu (Sugaiwa, et al. 2009) ;
- de verrou lors de prises délicates et potentiellement dangereuses (verre à pied avec / sans support) ou requérant la disponibilité des autres doigts (souris à 3 boutons) ;
- de verrou pour les prises en force, en complément du pouce ;
- de point de prise lors de la saisie d'objets suffisamment volumineux ou lourds pour impliquer la main entière (Cesari et Newell 1999)

De par sa position, son emploi et sa musculature, plutôt qu'un doigt « de plus » et potentiellement inutile notre petit doigt serait en fait un « pouce en second ».

d) Modèle géométrique/cinématique

Lors des mouvements, les surfaces des segments osseux, couvertes de cartilage, vont glisser les unes sur les autres et donner ainsi une grande flexibilité, une grande souplesse d'adaptation à la main dans son ensemble. De par la laxité ligamentaire l'articulation formée par deux surfaces va permettre le ou les mouvements de rotation pour lesquelles elle est « prévue » bien sûr, mais pourra aussi supporter un mouvement passif de faible amplitude, qu'il soit de translation ou de rotation. On peut aisément démontrer ce phénomène en appliquant une torsion à l'un des doigts longs : ce degré de liberté (DDL) est non contrôlable donc non permis, mais il est toléré.

La main est constituée principalement d'articulations trochléennes à un DDL (IPP et IPD) dont la forme peut rappeler celle d'une poulie, ainsi que d'articulations condyliennes à deux DDL en forme de selle (MCP et MP). Le pouce possède en outre les articulations scaphoïdo-trapézoïdienne et trapézo-métacarpienne qui ne rentrent pas dans ces catégories ; la première ne possède pas de DDL à proprement parler bien qu'elle engage le mouvement de flexion du pouce vers l'intérieur de la main par une translation de faible amplitude, et la seconde peut s'apparenter à une rotule dont le mouvement axial est couplé aux autres rotations (Kapandji 2007).

En conséquence, et bien qu'étant toujours sujet à discussion et notamment concernant le pouce (Santos et Valero-Cuevas 2006, Savescu 2006), on admet généralement que la main comprend entre 21 et 25 DDL, en fonction de la considération ou non de leur contrôlabilité individuelle ; on parlera de degrés de liberté effectifs (DDL_e) (Santello et Flanders, 1998, Clewley, Guckenheimer et Valero-Cuevas 2008, Pitarch, Yang et Abdel-Malek 2005).

Dans notre étude sur le sujet sain (voir chapitre IV) nous avons adopté un modèle prenant en compte 20 DDL_e pour 21 DDL (Figure I-7), le dernier (torsion du pouce) étant calculé à partir d'une relation linéaire découlant de deux autres DDL. Nous n'avons pas pris en compte l'arche palmaire et n'avons compté que 5 DDL pour le pouce afin de pouvoir utiliser au mieux les données fournies par un gant instrumenté.

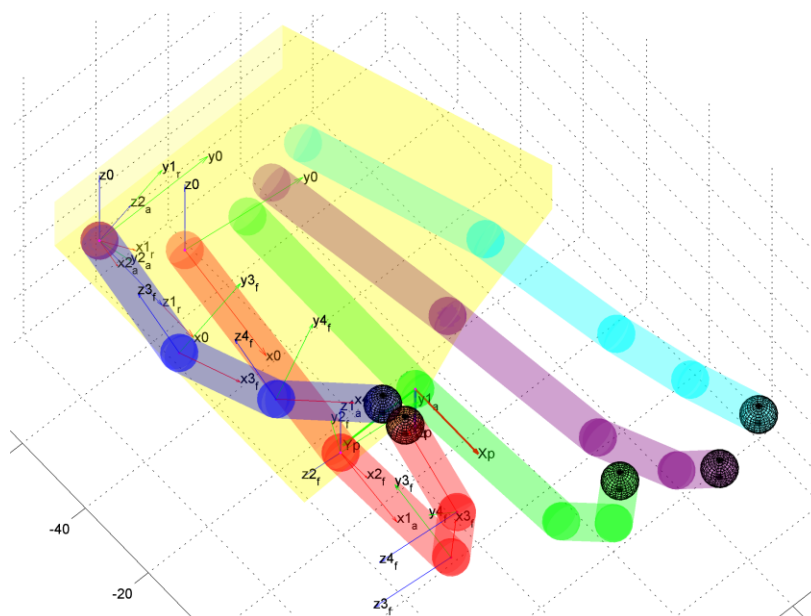


Figure I-7. Modèle géométrique de la main biologique, selon le formalisme de Denavit-Hartenberg modifié. Pour plus de clarté seuls les repères du pouce et de l'index sont indiqués, suivant l'ordre des articulations (repère 0 : attache de la colonne du doigt sur les os du carpe) ; les indices « r », « a » et « f » indiquent le type de mouvement auquel est rattaché le repère (roulis, abduction/adduction et flexion/extension,

respectivement). Le repère paume est labellisé « p ».

i) Détail du modèle : taille et implantation

Ce modèle se propose de reproduire au mieux l'anatomie humaine en respectant à la fois la longueur des différents segments osseux et leur implantation. Pour ce faire nous nous sommes appuyés sur plusieurs études anatomiques dont nous avons extrait les données nécessaires à l'établissement d'une main humaine « générique » ; les détails du processus de construction de cette main sont donnés dans le chapitre IV.

Notre modèle se compose donc des cinq chaînes cinématiques des doigts, depuis le poignet jusqu'aux points effecteurs, détaillées ci-dessous.

ii) Le pouce

Dans notre modèle le pouce ne dispose que de 5 DDL:

- le roulis (1_r) et
- l'abduction radiale (2_a), toutes deux appliquées à l'articulation TM ;
- la torsion et
- la première flexion (3_f), appliquées cette fois en MP ;
- la seconde flexion (4_f), sur l'articulation IPD.

Parmi ces DDL la torsion appliquée à l'articulation MP est calculée par une relation linéaire dépendant de l'abduction radiale et du roulis, comportement que l'on peut observer chez l'homme et qui permet l'opposition progressive du pouce avec les autres doigts ainsi que différents points de la paume.

Ce modèle comporte des limitations (Kapandji 2007) : en réalité toutes les phalanges du pouce participent à son orientation axiale grâce au même genre de couplage que celui mesuré en TM, mais n'étant pas en mesure d'évaluer ces mouvements nous les avons intégrés dans la torsion appliquée en MP. De même, la latéralisation de la seconde phalange a été englobée dans le mouvement d'abduction radiale. Enfin, nous n'avons pas considérés les DDL du point ST car nous ne pouvions pas les mesurer.

iii) Les doigts longs

Chaque doigt long est mu par quatre DDL appliqués à trois points d'articulation :

- l'abduction/adduction (1_a) et
- la première flexion (2_f) en MCP ;
- la seconde flexion (3_f) en IPP
- la troisième flexion (4_f) en IDP.

Il est courant d'utiliser un couplage entre la deuxième et la troisième flexion (voir chapitre III, section 3. a) mais nous avons choisi de les laisser indépendantes afin de pouvoir reproduire le plus fidèlement possible le comportement de la main humaine ; bien que communément admis l'existence de ce couplage peut être remise en cause même lors de mouvements libres (ElKoura et Singh 2003), et il est brisé lorsque les forces appliquées aux points de contact dépassent un certain seuil et se répercutent sur les articulations.

2. Contrôle du mouvement volontaire

Bien que la main soit un effecteur particulièrement subtil au niveau structurel, la difficulté de résolution d'un problème de saisie est tout autant lié à la complexité de cet outil-main qu'à la manière dont on essaie de le faire fonctionner.

Nos gestes quotidiens sont le fruit d'un apprentissage qui a duré des années, et qui est en perpétuel ajustement via les boucles d'intégration sensorimotrices s'appuyant sur plusieurs modalités sensorielles. Dans le cas de pratiques régulières ces habiletés manuelles peuvent atteindre des niveaux de précision et de rapidité qui semblent impossibles au premier abord, montrant bien la puissance de l'automatisation partielle et des boucles bas-niveaux qui sous-tendent le mouvement. Même si nous pouvons être conscients de notre intention d'effectuer une tâche et de la planification des mouvements à effectuer pour y parvenir, les détails de nos mouvements semblent se régler de manière automatique. En fait, devoir réfléchir à chaque mouvement que notre corps doit effectuer pour réaliser une tâche en fait baisser la performance.

a) Synergies

Comme nous avons pu nous en rendre compte dans la section I, de par sa structure la main humaine est implicitement synergique : l'action des muscles communs (EDL, FDS, FDL), les liaisons ligamenteuses inter-segmentaires ou inter-digitales, l'implantation des muscles intrinsèques font qu'une seule commande motrice agit en fait sur beaucoup de ses éléments.

Du point de vue du contrôle nous retrouvons aussi plusieurs niveaux de synergies, le premier se situant au niveau des unités motrices ; en effet, si chaque fibre musculaire est bien contrôlée par un seul motoneurone, un motoneurone se projette quant à lui sur plusieurs fibres. Le mode d'actionnement antagoniste des muscles entre aussi en jeu, un signal de commande étant à la fois facilitateur sur le muscle qu'il contrôle et inhibiteur sur le muscle qui lui est « opposé ». Ce mode d'actionnement intervient au niveau du contrôle d'une articulation mais aussi d'un membre entier ; ainsi les modes rythmiques (gérant la marche par exemple) montrent un schéma d'activation/inhibition entre les deux côtés du corps.

Enfin, le plus haut niveau de coordination qu'on puisse trouver se situe dans le télencéphale lui-même, à travers un réseau d'aires corticales interagissant de manière complexe et redondante.

b) Le mouvement est une relation sensorimotrice

Si le rôle du système moteur dans la génération de mouvement tombe sous le sens, il n'en est pas moins complémentaire de celui du système sensoriel : le traitement des données sensorielles nous permet d'établir une représentation interne du monde qui nous entoure et de l'état du corps que nous habitons, tandis que la génération de commandes motrices s'appuie sur la relation entre cette représentation et celle des conséquences du mouvement que nous désirons effectuer. Certaines « lois », appelées primitives motrices ou schémas moteurs, régissent le mouvement. Ces primitives sont des mouvements élémentaires aux caractéristiques spatiales et temporelles fortement stéréotypées, ajustables par apprentissage. Ces lois ne sont pas forcément dépendantes d'un organe effecteur donné ou d'une chaîne cinématique ; on pourra par exemple écrire de la même façon avec sa main, son pied ou encore son coude, et cette écriture sera reconnaissable (Hebb 1949). Ce phénomène, appelé équivalence motrice, nous permet de trouver une solution alternative à un problème inatteignable « normalement », comme c'est le cas par exemple chez certains patients ayant fait un accident vasculaire cérébral (Bensmail, et al. 2010).

De plus, il y a une relation claire entre la vitesse d'exécution d'un mouvement et sa précision, un compromis mis en évidence dès la fin du XIX^{ème} siècle avec les travaux de Woodworth (Woodworth 1899). Par exemple, la vitesse et l'accélération d'un mouvement d'atteinte sont modulées par la distance entre le point-cible et le point de départ de l'effecteur, ce qui signifie que l'étendue d'un mouvement est planifiée avant son exécution. Un programme moteur spécifie les caractéristiques spatiales d'un mouvement, les angles des articulations impliquées (cinématique du mouvement) ainsi que les forces à appliquer à ces articulations (dynamique du mouvement) (Kandel, Schwartz et Jessell 2000, Chap. 33).

c) Deux types de commande

L'efficacité d'un mouvement volontaire augmente avec la pratique, à mesure que les conditions de sa réalisation et les possibles perturbations sont intégrées et anticipées par l'apprenant. Pour effectuer cet apprentissage le SNC s'appuie sur ses retours sensoriels à travers deux mécanismes: d'abord en influence directe sur le ou les membres impliqués dans le mouvement au moment où celui-ci est effectué (commande en rétroaction), mais aussi en les intégrant/fusionnant afin de constituer une base de référence qui permettra par la suite de définir par anticipation la stratégie de mouvement la plus adaptée au contexte (commande en boucle ouverte). On notera la complémentarité temporelle de ces deux mécanismes.

La commande en boucle ouverte s'appuie sur les informations sensorielles instantanées et leur rapport avec l'expérience du sujet, ce qui permet d'anticiper les conséquences d'une action ou d'un stimulus de manière répétable, stéréotypée. Ce type de commande est essentiel dans la génération de mouvements rapides (même s'il est en fait impliqué dans la génération de tous les mouvements), ce qui nous permet de réagir sans attendre que la commande en boucle fermée ne soit pleinement effective. Celle-ci vient ensuite ajuster le résultat du mouvement. Dans le mouvement de pointage d'une cible visuelle par exemple la position de destination est d'abord estimée par le système visuel, qui génère un jeu de paramètres et permet de lancer le mouvement du bras en se basant sur la corrélation entre vision et proprioception qu'a fondé le sujet sur ses expériences passées. Pendant que le mouvement se déroule la commande en boucle fermée se met en place et permet d'ajuster la différence entre la position cible et la position effective, ce qui a pour effet de créer un ou plusieurs « rebonds ». De plus, elle est particulièrement importante dans le maintien postural et dans le contrôle des forces appliquées sur un objet tenu dans la main.

d) Les circuits neuraux impliqués.

Nous allons maintenant examiner les différents circuits qui permettent ce contrôle du mouvement volontaire. Il est important de noter que la plupart des résultats de ce domaine proviennent d'études sur le singe (macaque), dont les structures cérébrales sont très proches de celles de l'humain (pour ce qui est du contrôle moteur de la main en tout cas) (voir Figure I-11).

Le traitement des informations sensorielles et des commandes motrices est distribué de manière hiérarchique entre différentes populations neuronales de la moelle épinière, du tronc cérébral et du cerveau. Chacun de ces trois niveaux peut organiser et réguler des réponses motrices complexes en relation avec les autres niveaux et via l'intégration d'informations sensorielles. De plus les informations sensorielles sont traitées par plusieurs systèmes qui opèrent en parallèle.

En laissant de côté le cervelet et les ganglions de la base, qui sont des structures un peu particulières et dont nous développerons le rôle plus tard, nous pouvons diviser le contrôle volontaire du mouvement chez l'homme en trois niveaux :

- la *moelle épinière*, où prennent place les réflexes courte-latence, les synergies motrices et les actions rythmiques
- le *tronc cérébral*, qui gère en grande partie la posture à travers l'intégration de plusieurs modalités sensorielles, et qui est impliqué dans le contrôle des muscles distaux à travers les réflexes longue-latence
- le *cortex* et plus globalement le *cerveau antérieur* où se joue le mouvement volontaire à proprement parler : sa planification, la prédiction de l'état corporel attendu, l'apprentissage des tâches motrices, l'élaboration des séquences motrices plus ou moins complexes intégrant des synergies de commande

e) La moelle épinière : jonction neuro-musculaire et réflexes spinaux

La moelle épinière contient les circuits neuronaux qui régulent toute une gamme de réflexes bas-niveau et d'automatismes rythmiques. Différents interneurons et groupes de neurones moteurs reçoivent des signaux en provenance des niveaux supérieurs, qui peuvent influencer sur les réponses réflexes en facilitant ou inhibant différentes population d'interneurones, eux-mêmes impliqués dans la coordination motrice.

Si l'on part du niveau le plus bas, la première liaison motrice permettant le contrôle d'un muscle se fait à travers la jonction neuro-musculaire. Celle-ci est réalisée par la projection d'un nerf depuis le processus ventral de la moelle épinière jusque sur un groupe de fibres musculaires, constituant ainsi une unité motrice. La jonction proprement dite passe par la plaque motrice, où l'axone du nerf va transmettre un potentiel d'action au muscle à travers une liaison synaptique, entraînant sa contraction.

A l'inverse, l'influx sensoriel relatif au travail du muscle (volontaire ou non) constituant la proprioception est projeté dans le processus dorsal de la moelle. Il est multimodal car formé par les informations en provenance de plusieurs types de mécanorécepteurs, dont deux particulièrement dédiés aux muscles :

- Les terminaisons primaires et secondaires des fuseaux neuromusculaires, qui mesurent l'allongement des muscles ;
- Les organes tendineux de Golgi, qui mesurent la force développée à travers le tendon associé au muscle.

Pris ensemble, les ordres moteurs envoyés aux muscles (afférences) et les signaux générés par les fuseaux neuromusculaires qui en sortent (efférences) forment la première des boucles sensorimotrices : les réflexes courte-latence ou réflexes spinaux (Figure I-8). Ces deux circuits se rejoignent dans la moelle et s'influencent l'un l'autre à travers plusieurs étages de motoneurons et d'interneurones. La fonction première de ces réflexes spinaux, qualifiés aussi de « proprioceptifs » ou « d'étirement », dans la régulation des mouvements volontaires est d'ajuster les consignes motrices en fonction de la position des membres et du corps en général. Cela permet d'assurer la continuité de la coordination intermusculaire d'un mouvement en cours, ainsi que de compenser la variabilité intrinsèque des signaux moteurs qui s'avèrent assez bruités. Ils agissent comme une boucle de rétroaction entre l'allongement des muscles (mesuré par les fuseaux neuromusculaires) et leur contraction (induite par les motoneurons alpha), assurant le maintien de la longueur du muscle

proche d'une valeur de référence. Les réflexes d'étirement fournissent ainsi un mécanisme de compensation des petites perturbations liées à la contraction du muscle (dues à une charge imprévue par exemple, ou mal estimée) (Kandel, Schwartz et Jessell 2000, Chap 36). Les terminaisons primaires des fuseaux neuromusculaires sont liées aux fibres Ia (fibres rapides) et aux motoneurones α , tandis que les terminaisons secondaires sont liées aux fibres II (fibres lentes) et aux motoneurones γ . Les organes tendineux de Golgi sont eux liés entre autres aux fibres Ib (mixtes).

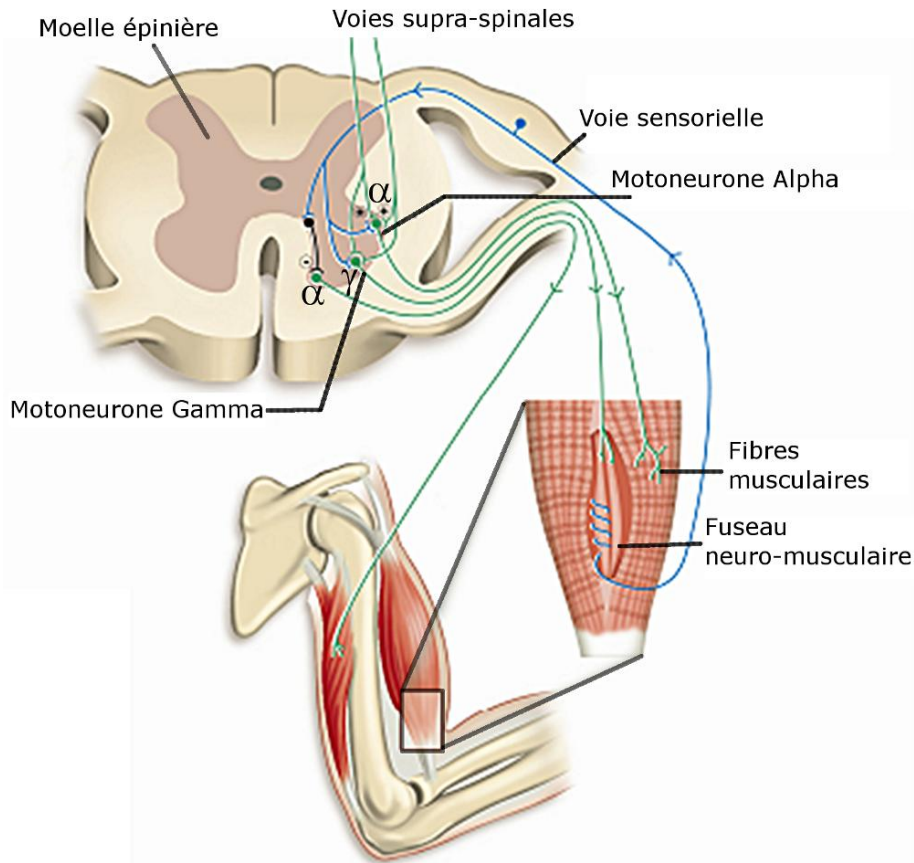


Figure I-8. Les voies spinales forment la première boucle sensori-motrice. Les signaux supra-spinaux peuvent être projetés de manière directe sur les motoneurones de la moelle (comme il est représenté ici) ou être relayés par un ou plusieurs interneurons ; Ils sont ensuite intégrés à la boucle sensorimotrice constituée par les voies effectrices (en vert) et les voies sensorielles (en bleu) qui permettent les réflexes spinaux.

Les fibres musculaires Ia peuvent exciter non seulement les motoneurones qui innervent le muscle dont elles proviennent mais aussi ceux qui innervent les muscles ayant une activité mécanique similaire. De plus les interneurons inhibiteurs Ia impliqués dans le réflexe d'étirement le sont aussi dans l'activation coordonnée de plusieurs muscles lors du mouvement volontaire. Les signaux descendant du cortex moteur sur les motoneurones alpha sont aussi transmis à ces interneurons, inhibiteurs des muscles antagonistes à ceux pour lesquels les signaux sont envoyés. Combiné au fait que ces interneurons reçoivent des informations sensorielles périphériques et peuvent gérer de manière autonome les variations des entrées somatosensorielles, ce mode de fonctionnement simplifie grandement le contrôle du mouvement volontaire par le SNC qui utilise les voies réflexes comme des composantes de mouvements plus complexes.

Encadré I-1 : neurone, potentiel d'action et synapse

Le neurone est une cellule particulière qui fait partie du réseau nerveux : elle reçoit, traite et transmet l'information sous forme de potentiels d'action qui peuvent s'apparenter à des influx électriques. Elle est constituée d'un ensemble de dendrites sur lesquelles vont s'effectuer les liaisons synaptiques entrantes, d'un soma où l'information va être traitée, et d'un axone qui va transmettre celle-ci via des liaisons synaptiques sortantes en contact avec les cellules suivantes (voir Figure I-9).

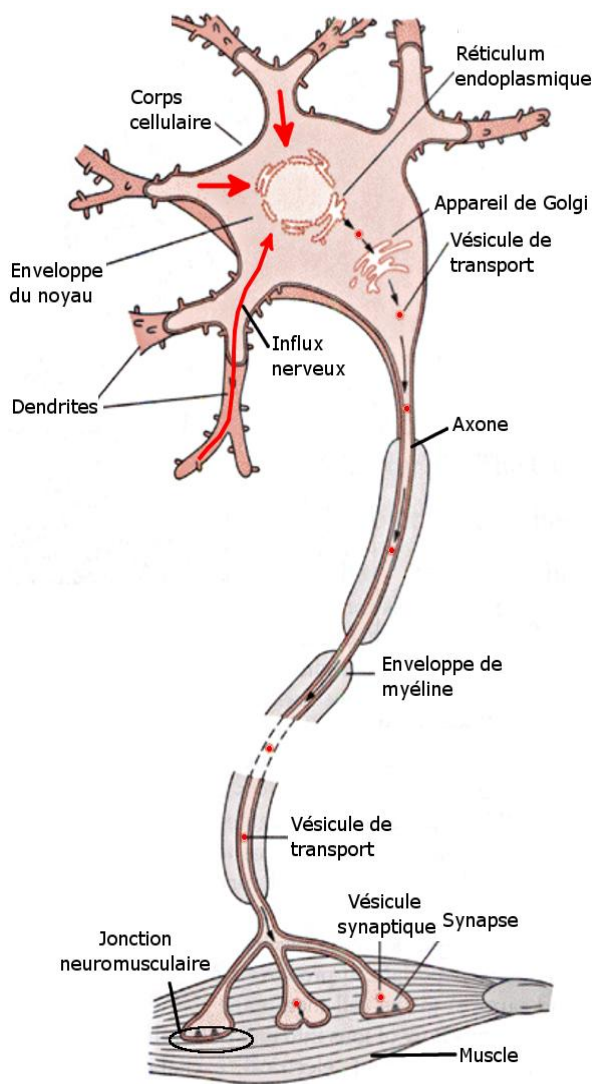


Figure I-9. Dessin d'un motoneurone spinal, effectuant la liaison entre les influx en provenance des cellules supraspinales et le muscle auquel il est rattaché. Adapté de [PRINCIPLES Chap 4].

La transmission au niveau des synapses se fait via les canaux ioniques : ceux-ci s'ouvrent et se ferment en fonction de la différence de potentiel à leurs bornes et laissent ainsi passer les ions auxquels ils sont sensibles : le Potassium (K^+), le Sodium (Na^+) et parfois le Calcium (Ca^{++}). Grâce à ce transit les ions vont modifier les charges de part et d'autres des canaux et ainsi générer des potentiels d'action (voir Figure I-10).

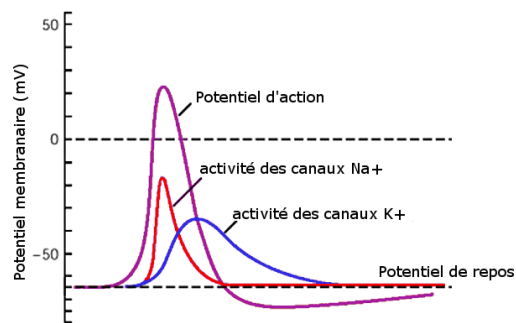


Figure I-10. Le potentiel membranaire évolue en fonction de la concentration ionique de part et d'autre de la membrane ; régulée par les canaux. Adapté de [PRINCIPLES Chap 9].

Les influx nerveux qui arrivent au soma sont intégrés de manière similaire, et s'ils atteignent et dépassent le seuil de décharge du neurone alors celui-ci transmet l'influx. Le signal transite alors à travers le réticulum endoplasmique et l'appareil de Golgi pour se propager le long de l'axone, jusqu'aux synapses terminales.

La convergence d'entrées afférentes en provenance des organes tendineux, des récepteurs cutanés et des mécanorécepteurs des articulations sur les interneurons inhibiteurs *Ib* réduit le niveau de contraction musculaire ; pour la main en particulier, ce mécanisme permet d'adapter la force musculaire développée lors de la saisie d'un objet délicat à travers un contrôle spinal précis de la tension des muscles (commande en rétroaction).

Les réflexes spinaux sont des mouvements coordonnés et involontaires liés directement à un stimulus externe. Ils ne sont cependant pas que des schémas moteurs stéréotypés : ils dépendent des propriétés de leur stimulus causal et de ses conditions d'apparition, ainsi que du possible apprentissage qui en a été fait.

De manière générale la transmission d'ordres moteurs par les voies réflexes dépend de la tâche motrice à effectuer, *celle-ci ayant une influence tant sur les signaux descendants que sur les réflexes spinaux à proprement parler*. De manière réciproque, les signaux en provenance de plus hauts niveaux modulent continuellement la force du réflexe d'étirement en inhibant ces mêmes motoneurons spinaux.

f) Tronc cérébral : intégration et réflexes supraspinaux

La seconde boucle prend place au niveau du tronc cérébral (Shadmehr et Wise 2005, Chap 6). Outre la gestion des viscères, des cycles de veille-sommeil, des signaux sensoriels comme la douleur et d'un grand nombre de comportements du complexe tête-cou (expression faciales, mastication, mouvements de la tête et des yeux, ...) celui-ci sert aussi de relais et d'intégrateur pour les voies cérébro- et cérébello-spinales à travers les deux systèmes descendants de la formation réticulée, respectivement médial et latéral. Le premier contribue à la gestion de la posture en intégrant des signaux visuels, vestibulaires et proprioceptifs ainsi que les réflexes spinaux. Le second est impliqué dans le contrôle des muscles distants, et donc dans les mouvements volontaires d'atteinte et de saisie, ou encore de manipulation (Kandel, Schwartz et Jessell 2000, Chap 33).

Les réflexes supraspinaux quant à eux sont des réponses pondérées par le cortex moteur et autres structures de haut niveau (tronc cérébral, cervelet) ; ils sont principalement impliqués dans la régulation des mouvements des muscles distaux, alors que les voies réflexes sous-corticales sont plutôt attachées aux muscles proximaux. Ceci peut s'expliquer par la précision requise par de nombreuses tâches impliquant les muscles distaux, telles la manipulation d'objets, et nécessitant l'intervention du cortex là où les centres spinaux sont suffisants pour assurer le maintien d'une posture (Kandel, Schwartz et Jessell 2000, Chap 36).

g) Cortex et cerveau antérieur : planification et exécution du mouvement volontaire

La troisième et dernière boucle monte jusqu'au cortex lui-même, à travers les nombreuses projections réciproques entre les différentes aires cérébrales impliquées dans le contrôle moteur du mouvement volontaire (Shadmehr et Wise 2005, Chap 6). Le mouvement volontaire diffère du mouvement réflexe selon plusieurs critères : il n'est pas dépendant d'un stimulus externe et y répondra de manière différente en fonction de la tâche, il est directement lié à celle-ci et au but qui en découle, et son efficacité augmente via l'apprentissage moteur (Kandel, Schwartz et Jessell 2000, Chap 38). Comme nous avons pu le voir, la variété des circuits réflexes dans la moelle épinière et le tronc cérébral simplifie les instructions que le cortex doit envoyer aux niveaux inférieurs, laissant les entrées sensorielles de ces niveaux gérer en partie les détails temporels du mouvement (Kandel, Schwartz et Jessell 2000, Chap 33).

Les premières aires impliquées dans le contrôle moteur se situent à la surface du cortex, de part et d'autre du sillon central ; le lobe pariétal (vers l'arrière) porte l'aire sensorielle primaire (ASP ou S1) tandis que le lobe frontal (vers l'avant) porte l'aire motrice primaire (AMP ou M1). Ces deux aires sont organisées de manière rétinotopique, c'est-à-dire qu'une population de neurones correspondra approximativement à une partie du corps auquel elle est reliée ; ce fait, énoncé par Clinton Woolsey dans (Woolsey, et al. 1952) a conduit à croire que le cortex « contenait » un homonculus dont chaque partie était clairement définie. En réalité il existe plusieurs zones de projection pour une même partie et de nombreux secteurs se recouvrent et se confondent (Poliakov et Schieber 1999, Sanes et Donoghue 2000), Shadmehr et Wise 2005, Fagard 2001). Ainsi par exemple lorsque l'on cherche à contrôler un doigt en particulier des neurones s'activent dans toute la zone du cortex moteur primaire correspondant à la main ; si l'on parvient à supprimer ce « bruit de fond » on peut cependant arriver à caractériser un signal propre à chaque doigt chez l'homme (Schieber et Santello 2004).

Ces deux aires primaires sont aussi organisées de manière symétrique par rapport au sillon qui les sépare, ce qui permet d'établir des projections directes très courtes (et donc très rapides) entre les secteurs dédiés à une même partie du corps.

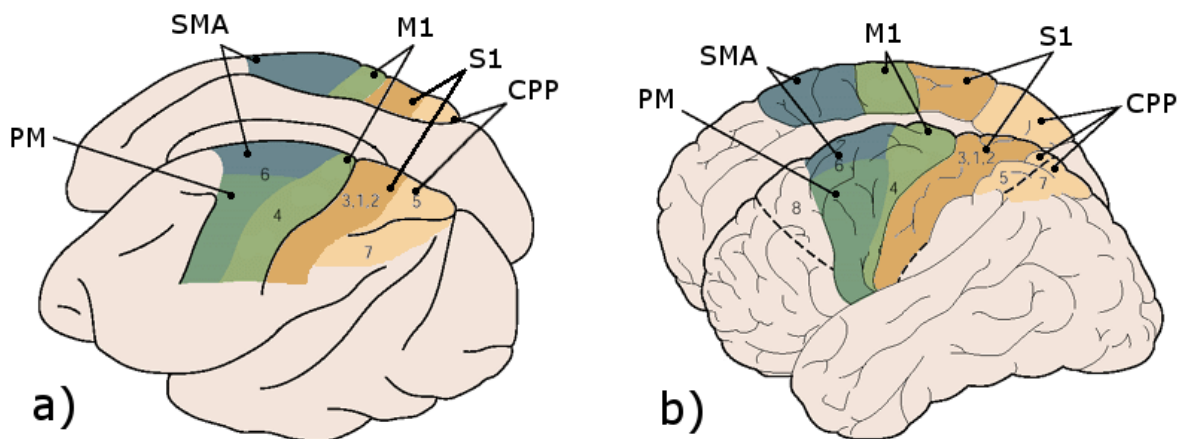


Figure I-11. Les correspondances établies à ce jour entre les circuits neuronaux du macaque (a) et ceux de l'humain (b). Les zones principales impliquées dans la génération du mouvement volontaires sont indiquées en couleur : le Cortex Pariétal Postérieur (CPP) en jaune, le cortex Somatosensoriel primaire (S1) en marron, le cortex Moteur primaire (M1) en vert clair, les aires PréMotrices (PM) en vert foncé, l'Aire Motrice Supplémentaire (SMA) en bleu. Les numéros donnent la correspondance de ces zones dans la notation de Brodman. Adapté de (Kandel, Schwartz et Jessell 2000, Chap 38)

h) Aires motrices

Nous allons maintenant examiner en détails les aires corticales intervenant dans la génération du mouvement chez l'homme.

i) Cortex moteur primaire (M1)

Chaque muscle ou groupe de muscles est représenté non pas par une mais plusieurs zones distinctes dans le cortex moteur primaire (M1). De plus, l'analyse du cortex chez le singe nous révèle une apparente organisation concentrique de cette aire cérébrale, avec au centre les muscles les plus proximaux et à l'extérieur les plus distaux et de nombreux recouvrements entre ces zones (Figure I-12). Cette redondance vient grandement nuancer la vision d'un « homonculus embarqué », et implique une grande souplesse dans les différentes combinaisons muscles-tâches mises à disposition

des autres aires motrices qui projettent dans M1. De plus cette organisation présente une forte plasticité, mise en évidence par de nombreuses études cliniques menées suite à un incident traumatique (Pascual-Leone, et al. 1996, Weiss, et al. 2000) ou plus simplement par l'adaptation ou l'apprentissage de tâches motrices (Elbert, et al. 1995).

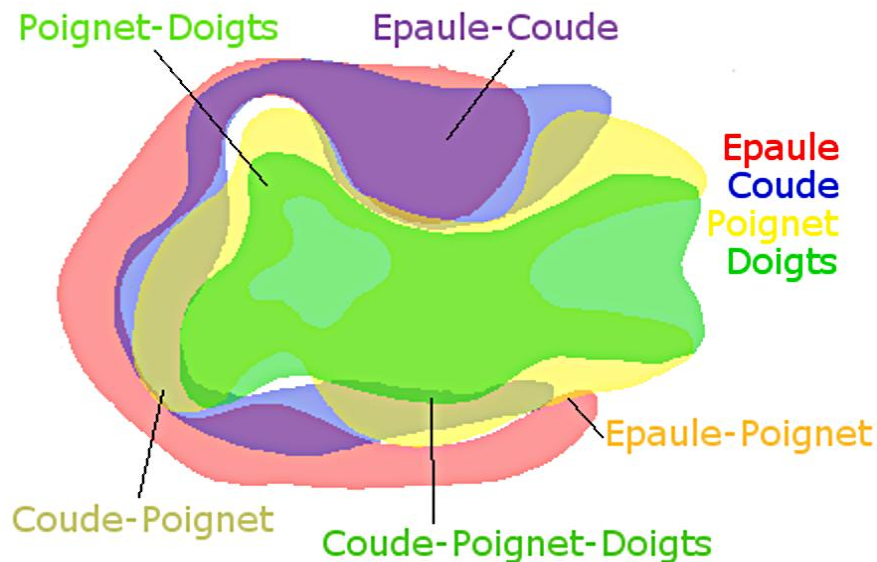


Figure I-12. Organisation des différentes zones motrices du membre supérieur dans le cortex précentral du singe. On constate que si l'agencement est bien rétinotopique, il comporte aussi de nombreux recouvrements entre les zones dédiées à chaque articulation. Adapté de (Kwan, et al. 1978).

M1 reçoit des informations organisées de manière somatotopique en provenance de deux sources principales : le cortex somatosensoriel primaire (S1) et l'aire postéro-pariétale 5, impliquée dans l'intégration multimodale nécessaire à la planification motrice. La relation M1-S1 est primordiale en cela qu'elle établit de manière directe la boucle de contrôle d'un groupe de muscles, et donc la réaction à une perturbation la plus courte au niveau cortical. Les projections dans M1 en provenance des différentes aires prémotrices sont de plus haut niveau et concernent principalement les commandes motrices faisant suite à la planification du mouvement. Avant que le mouvement ne soit exécuté on peut mesurer une activité dans M1 représentant les paramètres cinématiques et dynamiques du mouvement (Kandel, Schwartz et Jessell 2000, Chap 38).

La voie principale utilisée par le cortex pour contrôler les muscles de la main et des doigts est celle constituée par la projection monosynaptique des neurones de M1 sur les motoneurones distaux à partir des cellules corticomotoneuronales (CM). De par la nature distribuée de leur projection elles contrôlent non pas un mais plusieurs groupes de muscles, parfois sur plusieurs articulations différentes (synergies). Ce phénomène est particulièrement important pour la main, où de fortes corrélations existent entre les doigts à tous niveaux ; pour ce qui est de M1, les neurones réagissant au mouvement individuel de chaque doigt sont répartis dans toute la zone dédiée à la main et ne fonctionnent pas de manière indépendante : le mouvement d'un doigt en particulier ne résulterait donc pas de la décharge d'une population de neurones seule mais, de manière analogue au vecteur de contrôle du mouvement du bras mis en évidence par Georgopoulos (Figure I-13), de la somme pondérée des contributions de toute une zone en fonction de la tâche. En effet les CM de cette zone codent de manière explicite la tâche de saisie ou de manipulation à travers l'activation coordonnée d'un groupe de muscles impliqués dans cette tâche ; cela nous indique que le cortex moteur primaire ne code pas que les paramètres bas-niveau du mouvement (angles, forces, ...) mais aussi d'autres paramètres haut-niveau en relation avec la trajectoire à effectuer pour saisir un objet.

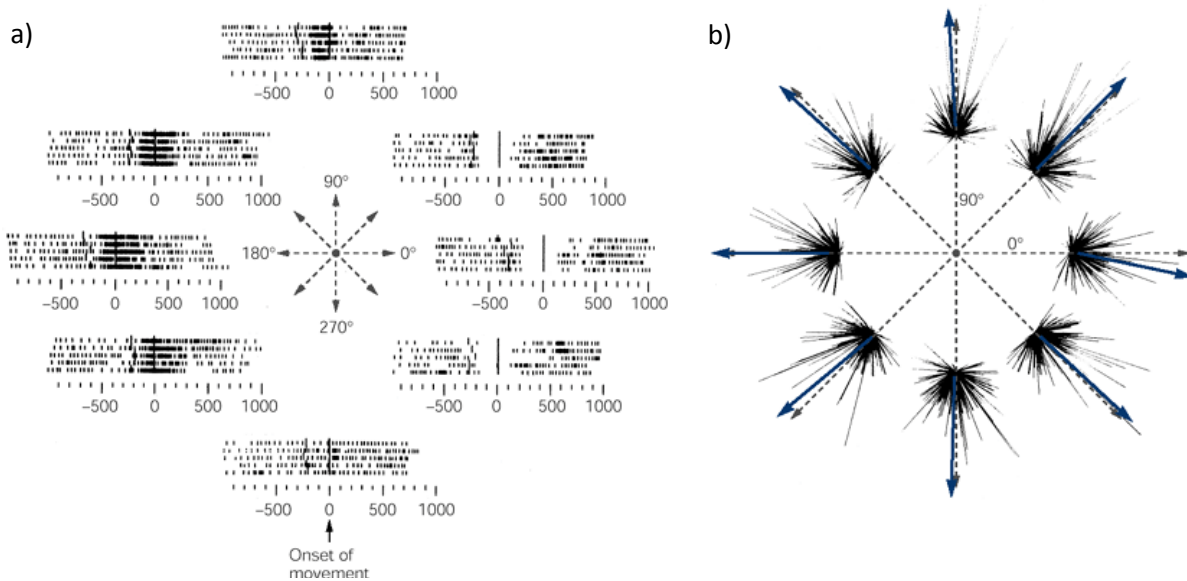


Figure I-13. la direction du mouvement est codée par l'activation de plusieurs populations de neurones dans le cortex moteur (Georgopoulos, et al. 1982). a) Enregistrement de l'activité d'un neurone pendant que le singe effectue des mouvements de pointage dans 8 directions différentes. On constate nettement que la direction « préférée » de ce neurone correspond à un angle compris entre 90° et 225°. Chaque neurone dédié au mouvement du bras sera ainsi « réglé » de manière à réagir plus fortement à une certaine gamme de signal. b) Ces neurones sont néanmoins tous actifs durant le mouvement ; la somme de cette activité constitue un vecteur de population (flèche bleue pleine), qui correspond de manière précise à la direction du mouvement (flèche noire pointillée) tant en direction qu'en amplitude.

ii) Aires motrices non-primaires

Le premier étage de la transformation sensorimotrice a lieu dans le Cortex Pariétal Postérieur (CPP). Les aires qui le constituent traitent les différentes modalités sensibles en rapport avec la tâche: elles les intègrent quand c'est nécessaire (Gentile, Petkova et Ehrsson 2011, Tagliabue et McIntyre 2011) et en tirent les informations à transmettre aux aires prémotrices, que ce soit directement ou via le Cortex PréFrontal (PFC). Ainsi, les neurones des aires Intrapariétales ventrale et médiane (VIP et mIP, respectivement) reçoivent des informations à la fois somatosensorielles et visuelles dans le premier cas, proprioceptives et visuelles dans le second. Certaines de ces cellules réagissent aux deux types d'information, codant à la fois le mouvement du bras et la localisation de la main (Johnson, et al. 1996). Toutes ces aires sont actives à partir du moment où la tâche a été identifiée et jusqu'au moment où le mouvement est lancé ; de plus, le fait d'imaginer un mouvement évoque la même activité dans les aires prémotrices et les aires du CPP que la réalisation du mouvement lui-même.

Quatre aires prémotrices principales ont été identifiées chez le singe : les aires Prémotrices ventrale et dorsale (PMv et PMd, respectivement), l'Aire Motrice Supplémentaire (SMA) et l'Aire Motrice Cingulaire (CMA) ; une organisation similaire est attestée chez l'homme, même si son identification précise reste sujette à caution (Figure I-11). Toutes ces aires prémotrices sont fortement interconnectées à travers un réseau de boucles de rétroaction. Elles reçoivent aussi des signaux en provenance du cervelet et des ganglions de la base, relayés par le thalamus. Elles projettent à la fois dans M1 et la moelle épinière où ces projections se superposent avec celles de M1 pour un même groupe de muscles (Kandel, Schwartz et Jessell 2000, Chap 38).

Les mouvements initiés de manière autonome (sans stimulus extérieur particulier) sollicitent principalement l'aire SMA. Celle-ci semble impliquée dans la préparation des mouvements basés sur la mémoire et non sur des entrées visuelles (planification). Elle permet la réalisation de programmes moteurs à partir de séquences apprises ; on peut d'ailleurs y mesurer une activité en rapport avec l'ordre des mouvements à effectuer avant que ceux-ci ne commencent. L'aire motrice présupplémentaire est la principale entrée de la SMA ; elle ne projette que sur elle. Contrairement à la plupart des zones examinées jusqu'à présent elle ne présente pas d'organisation somatotopique, et serait impliquée dans la mémorisation des séquences motrices utilisées par la SMA (Kandel, Schwartz et Jessell 2000, Chap 38).

Les mouvements qui répondent à un stimulus quant à eux impliquent principalement les aires prémotrices latérales PMv et PMd.

Dans la première, l'activité des cellules réagit au positionnement du bras dans l'espace ; elle encode la position de la cible à atteindre par rapport à celle de l'organe effecteur (Shadmehr et Wise 2005, Chap 14]. Il est d'ailleurs intéressant de constater que ces neurones déchargent lorsqu'on place un objet à proximité de la main, et continuent de le faire même si l'objet n'est plus visible (Graziano, Yap et Gross 1994) ; de plus, lorsqu'un objet est saisi et utilisé comme outil, les cellules de cette aire l'intègrent plus ou moins rapidement à leur activité (Obayashi, et al. 2001, Maravita et Iriki 2004).

Les neurones de l'aire PMd latérale quant à eux codent à la fois la direction et la position de la cible à atteindre ; ils réagissent à la fois aux stimulations visuelles et à la trajectoire de la main. De plus, cette aire est impliquée dans l'apprentissage associatif, c'est-à-dire l'établissement de cause à effet entre un stimulus qui n'a *a priori* rien à voir avec la tâche et le mouvement requis.

i) Autres structures corticales : cervelet et ganglions de la base

En plus de ces trois niveaux, le cervelet et les ganglions de la base régulent les signaux des aires motrices du cortex et du tronc cérébral via le thalamus.

Le cervelet intervient pour beaucoup dans le contrôle de la posture, des activités rythmiques et du contrôle moteur en général. Il est classiquement considéré comme équivalent à un comparateur entre les afférences générées par le cortex moteur et les efférences renvoyées par les actionneurs. De la même façon, il module les commandes motrices envoyées par les structures qui lui sont supérieures en réponse aux signaux provenant du Noyau de l'Olive Inférieure (ION), corrigeant ainsi les conséquences motrices des mouvements inattendus ou subis (Shadmehr et Wise 2005, Chap 23) et participant à la seconde boucle sensorimotrice. Enfin il joue un rôle essentiel dans l'apprentissage des modèles internes dynamiques et le contrôle des mouvements de saccades oculaires (Schweighofer, Arbib et Dominey 1996a, 1996b, Eskizmirli, Forestier, et al. 2002).

Les ganglions de la base agissent comme un élément de concaténation ; ils détectent et reconnaissent un certain nombre de contextes possibles pour un comportement donné et participent à la réaction du corps à ces contextes ; ainsi, plusieurs situations différentes pourront provoquer un même comportement chez le sujet. Ils reçoivent leurs informations du cortex et du thalamus, reprojettent vers celui-ci et projettent vers le tronc cérébral.

Le thalamus est un point central dans le processus d'intégration de l'information par le cerveau ; il est compris dans de nombreuses boucles de projection et participe au fonctionnement en réseau d'un grand nombre de structures cérébrales.

j) Relation visuo-motrice

Le rôle de la vision est de première importance dans les processus d'atteinte et de saisie, et bien que cet aspect ne soit pas implémenté dans les travaux que nous décrivons par la suite il serait maladroit de ne pas l'examiner dès lors que nous traitons ces processus. Malgré le fait que la relation entre l'œil et la main ne soit pas encore totalement caractérisée (qui des deux guide l'autre ? l'œil qui perçoit ou la main qui agit ?) (Crawford, Medendorp et Marotta 2004, Dominey, Vindras, et al., 1998) elle est omniprésente chez l'homme, qui dépend beaucoup de son système visuel au quotidien ; il a d'ailleurs été établi que la planification du mouvement de la main se fait dans un repère lié au regard, même si celui-ci ne peut pas voir la cible (Shadmehr et Wise 2005). Suivant les travaux désormais classiques de Jeannerod sur cette relation (Arbib 1981, Jeannerod, 1981, 1999, Jeannerod, Arbib, et al. 1995). il n'y a pas un mais deux circuits (ou « canaux ») visuo-moteur, différenciables aussi bien par leur fonction respective que par les structures cérébrales impliquées (Figure I-14).

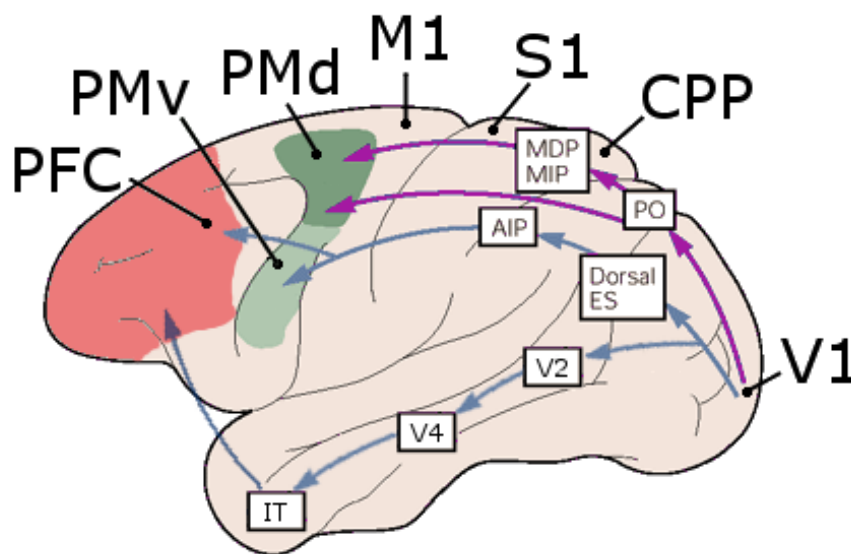


Figure I-14. La transformation visuo-motrice du mouvement d'atteinte et de saisie relie le cortex Visuel primaire V1 et les aires PréMotrices PMd et PMv par deux voies séparées, elles-mêmes se subdivisant en plusieurs branches (Atteinte en violet, Saisie en bleu).

Ces deux canaux reliant l'aire visuelle primaire (V1) au cortex préfrontal (PFC) sont dédiés particulièrement à l'atteinte (voie dorsale) et à la saisie (voie dorsale et ventrale).

Le circuit dédié à l'atteinte (en violet sur la Figure I-14) passe par l'aire extrastriale pariéto-occipitale (PO) avant de rejoindre l'aire prémotrice dorsale, soit directement, soit en passant par les aires médiales intra- et dorsopariétales (MIP et MDP, respectivement). Il permet d'établir la direction du mouvement à effectuer à partir de la position de l'objet.

Celui dédié à la saisie (en bleu sur la Figure I-14) est double, la voie dorsale transitant par le cortex extrastriale dorsal (Dorsal ES) et l'aire intraPariétale antérieure (AIP) pour projeter jusqu'au cortex préfrontal (PFC) et l'aire prémotrice ventrale tandis que la voie ventrale se propage dans les cortex Visuels secondaire V2 et V4 jusqu'au cortex inférotemporal (IT) pour ensuite converger sur le PFC. La première est chargée d'extraire et analyser les caractéristiques des objets (affordances, voir section 2, j) afin de déterminer comment ils doivent être saisis, tandis que la seconde permet de caractériser et reconnaître les objets.

Ces deux circuits, bien que clairement autonomes, n'en sont pas moins interdépendants (Jeannerod, Boussaoud et Jacob 1998) ;

Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, les mécanorécepteurs ont aussi un rôle dans le contrôle moteur du mouvement en général (volontaire ou non) (Ghez, et al. 1995). Même si l'utilisation de la main dépend beaucoup des informations visuelles il serait faux de penser que nous n'avons besoin de rien d'autre. Les sujets desafférentés (n'ayant pas ou peu de proprioception) ne savent pas où se trouvent leurs membres s'ils sont hors de leur champ de vision ; ils ne peuvent pas effectuer de mouvement précis vers une cible sans l'avoir « sous les yeux ». De plus, une fois qu'ils ont réussi à saisir un objet ils sont incapables de maintenir une position stable de leur main, ils ne peuvent corriger sa dérive dans l'espace (Shadmehr et Wise 2005). De plus, lors de la saisie d'un objet, la proprioception est indispensable au contrôle de la conformation de la main et à l'évaluation de la force à appliquer en fonction de la masse dudit objet, la position de son centre de gravité (Johansson 1996) et sa résistance aux déformations. Les informations données par les récepteurs cutanés, quant à eux, viennent compléter cette conformation en permettant à la main de sentir la forme et la texture de l'objet.

k) Les processus d'apprentissage.

L'acquisition d'une habileté motrice met en œuvre un traitement des informations massivement parallèle, dans de nombreuses aires motrices corticales et sous-corticales (Jeannerod, Arbib, et al. 1995) ; cela demande beaucoup de ressources car le cerveau cherche alors à minimiser les erreurs dans tous les circuits à la fois afin de converger vers une solution. A mesure que la tâche est apprise, la fréquence de mise à jour des programmes moteurs et de leur correction diminue, et en conséquence les ressources nécessaires à ces corrections aussi. Ainsi, l'activité et le nombre de circuits impliqués décroissent et leur localisation suit un axe frontalo-central : dans un premier temps le cortex préfrontal, l'aire motrice présupplémentaire et les ganglions de la base antérieure sont très sollicités ; puis la SMA et le PPC consolident l'aspect routinier de la tâche, évaluant ses performances avec l'appui du cervelet (Jueptner, et al. 1997, Nakamura, Sakai et Hikosaka 1998). Dans ce processus la SMA a pour rôle de renforcer la vitesse d'exécution de la séquence motrice (Shadmehr et Wise 2005, Chap. 25), puis elle voit son activité décroître alors que l'apprentissage se poursuit, jusqu'à extinction. De même, lorsque la tâche est devenue « automatique » après une longue période d'entraînement, elle ne montre plus de participation significative à son exécution : il ne reste plus que M1. Suivant cette logique la redondance des circuits nécessaires au mouvement s'efface, ne laissant plus actif que le minimum possible de ces circuits pour l'exécution de la tâche qui a été apprise (Kandel, Schwartz et Jessell 2000, Chap 38).

l) Planification

Le niveau le plus haut du contrôle moteur est constitué par la planification du mouvement. Celle-ci s'appuie non seulement sur les entrées sensorielles et motrices mais sur l'expérience du sujet à travers l'apprentissage et plusieurs niveaux de mémoire. La réponse d'un sujet à un contexte donné se fera en fonction de sa familiarité avec ledit contexte ; si celui-ci est constitué d'éléments rencontrés de nombreuses fois (tâche et environnement quotidiens) le mouvement suivra la voie tracée précédemment lors de l'apprentissage de la tâche, avec une variabilité très faible. A l'inverse, si le contexte est partiellement ou complètement nouveau le SNC s'appuiera sur ses capacités de généralisation à partir d'éléments estimés proches et générera une réponse inédite, parfois mal adaptée (Le développement de techniques de jeu d'un instrument de musique en autodidacte, pas exemple). Cependant, ce contexte, la réponse générée et les conséquences de cette réponse seront examinées et possiblement mémorisées pour une réutilisation ultérieure. En fonction du contexte toujours (niveau de similitude avec l'expérience acquise, intensité et fréquence de stimulation, implication du sujet dans la réalisation de la tâche, ...) cette mémorisation viendra soit nuancer un

schéma de réponse déjà établi (adaptation) soit créer un nouveau schéma (développement d'une nouvelle habileté motrice) (Kerlirzin, Dietrich et Vieilledent 2009).

m) Importance de la tâche et affordances.

Lorsque l'on travaille sur la saisie et la manipulation d'objet la notion de tâche à accomplir est primordiale. On définira ce type de tâche comme étant ce que l'on **doit** faire avec un objet une fois qu'on l'a saisi, ce qui va dépendre de plusieurs facteurs :

- la compréhension de ce qu'on **peut** faire avec cet objet (affordances, voir ci-dessous)
- la consigne qui nous est donnée
- la mise à disposition des éléments nécessaires à l'accomplissement de cette tâche.

« Accomplir une tâche » signifie comprendre et mettre en relation ces différents éléments en vue de l'atteinte d'un but (que l'on s'est fixé ou que l'on nous a fixé). On admettra sans peine que l'utilisation de nos mains est indissociable de cette notion de tâche, de but ; lorsque nous saisissons un objet nous le faisons de la manière la plus appropriée au but que nous souhaitons atteindre (Figure I-15 et Figure I-17).



Figure I-15. Un objet, trois façons de le saisir en fonction de la tâche à accomplir. a) Prise pour boire. b) Prise pour examiner. c) Prise pour transporter.

Cependant, l'utilisation d'un objet en vue de réaliser une tâche implique la compréhension de cet objet et de ses possibilités ; ce « découpage » a été défini par Gibson sous le terme d'affordances, ou possibilités fournies par un objet (en anglais *to afford* signifie –entre autre– fournir, donner) (Gibson 1982). Les affordances d'un objet font partie de ses caractéristiques intrinsèques, elles ne sont pas dépendantes de la personne qui réalise la tâche ; même si personne ne lui a jamais expliqué comment se servir d'un tournevis, le potentiel d'utilisation de l'objet est là et ne peut lui être enlevé (de même personne ne pourra vous empêcher d'utiliser un marteau comme presse-papier, par exemple). La réalisation d'une tâche va donc dépendre des affordances que le sujet va percevoir, et de la détermination de la saisie la plus pertinente qui en suivra (Sartori, Straulino et Castiello 2011).

3. Outils de compréhension et de modélisation du contrôle de la main

a) Les taxonomies

Devant la complexité implicite de la main et de son contrôle, des chercheurs ont tenté de catégoriser les différents types de saisie à travers des taxonomies plus ou moins détaillées, la plupart du temps en fonction du nombre de doigts impliqués et des segments de ces doigts en contact avec l'objet (Santello et Soechting, 1998). Pour reprendre les propos de van Nierop et al. (van_Nierop, et al. 2007) « dans la recherche sur le mouvement de la main nous pouvons trouver beaucoup de taxonomies et elles sont [potentiellement] infinies » (voir (MacKenzie et Iberall 1994, Chap.2 et app. B pour une vision globale de ces classifications dans le domaine) ; nous n'en présenterons ici que quelques-unes parmi les plus reconnues.

Bien que des travaux antérieurs de ce type ait été publiés (Schlesinger 1919, Griffiths 1943, McBride 1963), la plupart des classifications actuelles trouvent leur source dans la dichotomie établie par Napier en 1956 (Napier 1956). Dans cet article ont été exposés deux concepts très forts : la **prise en puissance** (*Power Grip*) et la **prise de précision** (*Precision Grip*). Selon les propres mots de l'auteur « ces deux [types de prise] se distinguent [l'un de l'autre] à la fois du point de vue anatomique et du point de vue fonctionnel ». Lors de la prise en force les doigts longs forment la mâchoire d'une pince et rabattent l'objet vers la paume tandis que le pouce ferme la prise et la verrouille ; ce type de prise est adapté à un contrôle total de l'objet, la saisie pouvant s'opposer à n'importe quelle force perturbatrice.

A l'inverse, la prise de précision est plutôt destinée à la manipulation fine d'un objet et n'offre que peu de résistance face à une perturbation. Elle est caractérisée par l'utilisation de la phalange distale du pouce en opposition avec un ou plusieurs autres doigts (segment distal ou côté) ainsi qu'une implication minimale de la paume.

Plutôt qu'une classification *ad hoc* ces deux concepts sont à considérer en fonction de leur importance dans la tâche à accomplir ; ainsi, deux configurations de mains assez similaires entreraient dans une catégorie ou l'autre en fonction de la prédominance de la précision ou de la puissance vis-à-vis du problème à résoudre (OttoBock, Romero, et al.). De plus certaines tâches requerront ce que Napier définit lui-même comme une saisie « combinée » ou « composite », où certains des doigts effectueront une tâche de précision tandis que les autres seront utilisés en puissance (Figure I-16).

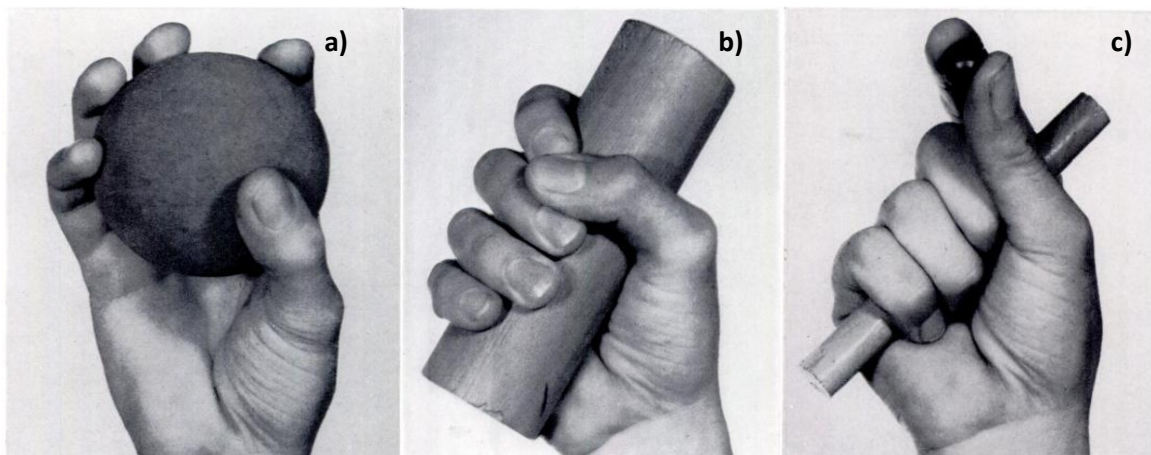


Figure I-16. Le formalisme de classification de prises en fonction de la tâche défini par Napier dans (Napier 1956). a) Prise de précision. b) Prise en puissance. c) prise combinant les deux aspects.

Cette première distinction a été nuancée par Cutkosky dans (Cutkosky 1989) en ajoutant au caractère de la prise (précision/puissance) le nombre de doigts en contact avec l'objet et leur répartition sur celui-ci (Figure I-18). Ces deux critères vont dépendre de la taille de l'objet relativement à la main qui les saisit et bien entendu de sa géométrie. Dans ce même article sont posés les différents éléments permettant de décrire une configuration de saisie à travers la relation entre l'objet et la main, et que nous pouvons retrouver dans la littérature traitant de la synthèse et de l'évaluation de prises (Bicchi 2002, Bicchi et Kumar 2002, Okamura, Smaby et Cutkosky 2000) :

- la résistance de l'objet aux forces qui lui sont appliquées au niveau des points de contact, ainsi qu'au glissement lorsque soumis à des forces extérieures
- la connectivité entre la main et l'objet, c'est-à-dire le nombre de DDL qui les sépare l'un de l'autre (si un outil est utilisé pour la saisie, par exemple),
- le respect des critères de verrouillage en force (*Force Closure*) ou de verrouillage géométrique (*Form Closure*), c'est-à-dire l'impossibilité pour l'objet saisi de bouger lorsqu'il est soumis à un couple extérieur d'amplitude moyenne ou lorsqu'il est totalement contraint (Figure I-17),
- l'isotropie de la configuration de saisie, et donc la possibilité pour chaque doigt recruté d'appliquer de manière efficace un couple sur l'objet (si un doigt est près de ses butées articulaires il sera limité dans la direction correspondant à ces butées),
- les forces internes applicables à l'objet sans qu'il y ait perturbation de la saisie,
- la manipulabilité de l'objet : un fois pris en main, est-il possible de le faire bouger de manière arbitraire ?
- enfin : la stabilité de la main, tant du point de vue cinématique que dynamique, si la saisie est perturbée.

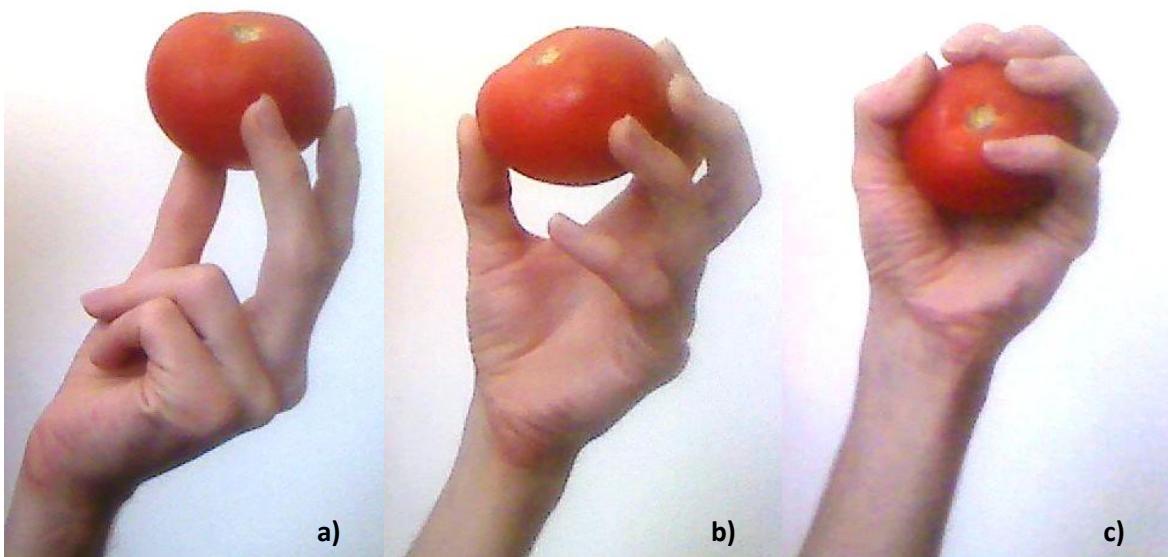


Figure I-17. Trois types de prises et la satisfaction des critères de prises qui leur correspond. a) Saisie non-préhensile, l'objet repose sur l'extrémité des doigts ; aucun verrouillage. b) Prise de précision circulaire ; verrouillage en force de par l'opposition des doigts et du pouce. c) Prise en force circulaire ; verrouillage géométrique de par l'opposition des doigts, du pouce et de la paume : l'objet est totalement contraint.

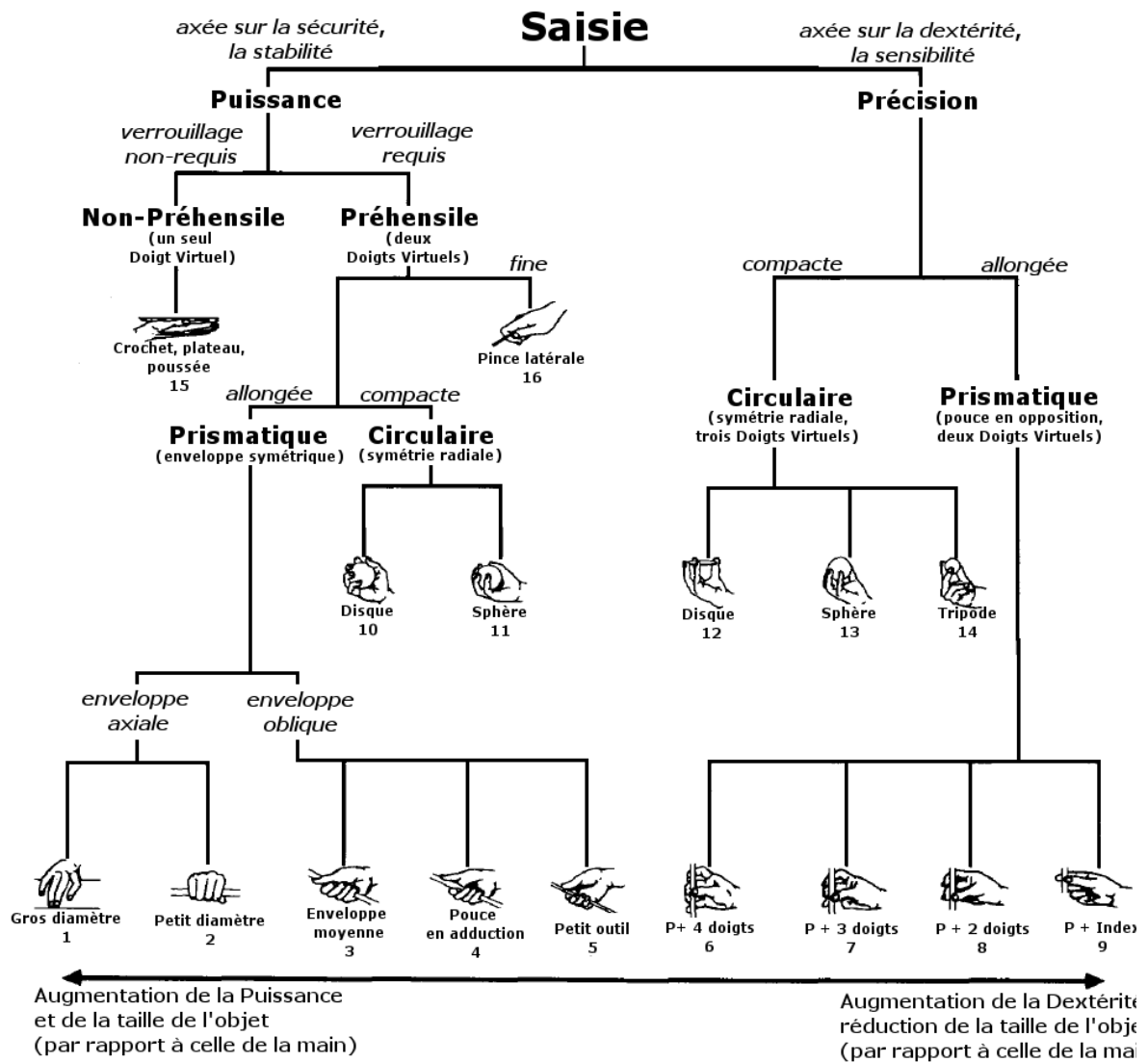


Figure I-18. Exemple de taxonomie permettant de classer les différentes saisies en fonction de leur « type principal » (puissance ou précision), de la géométrie de l'objet et du nombre de doigts impliqués (paramètre dépendant de la taille relative de l'objet par rapport à celle de la main). Adapté de (Cutkosky 1989).

b) Les doigts virtuels.

Examinée d'un point de vue global, la conformation des doigts lors de la saisie d'un objet peut-être exprimée en fonction de sous-groupes appelés doigts virtuels (*virtual fingers* ou VF) (Arbib, Iberall, et al. 1985, Iberall et Arbib 1990, MacKenzie et Iberall 1994). Ceux-ci sont déterminés en fonction de l'axe d'opposition et des parties de la main situées à chaque extrémité de cet axe (voir Figure I-19). Les doigts virtuels sont donc à géométrie variable et peuvent se composer d'un à quatre doigts, voire d'aucun lorsqu'il s'agit d'une prise en force non-verrouillée par le pouce : VF1 sera alors la paume et VF2 sera le groupe des quatre doigts qui lui sont opposés (Figure I-19, b). En dehors de cette configuration et plus généralement pour toutes les prises en précision, le pouce est traditionnellement considéré comme VF1 (Figure I-19, a et c).

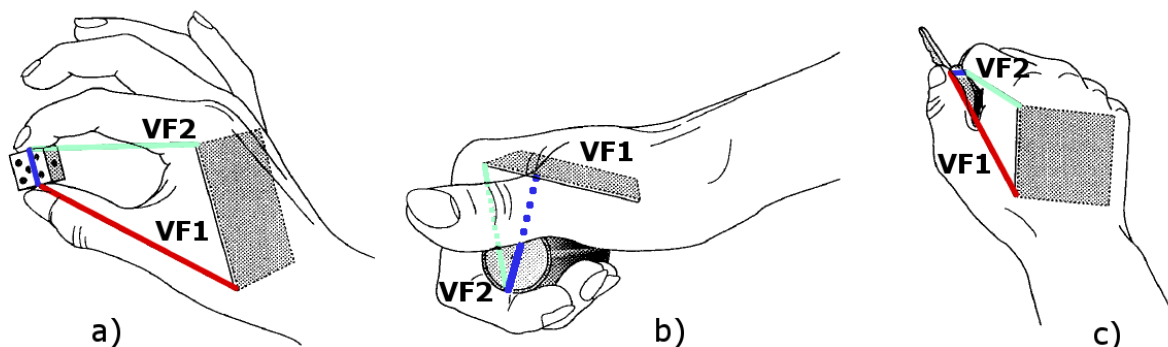


Figure I-19. Trois configurations de prises pouvant être ramenées à deux doigts virtuels. a) Prise de précision prismatique mettant en opposition le pouce (VF1) et l'index (VF2). b) Prise en force avec pouce en adduction entre la surface de la paume (plan grisé, VF1) et les doigts longs (VF2) c) Prise en force pulpo-latérale entre le pouce (VF1) et le côté de l'index (VF2). L'axe d'opposition est celui que vont suivre les VFs pour venir saisir l'objet, indiqué ici par le segment bleu. D'après (MacKenzie et Iberall 1994, p. 34)

c) La réduction des DDL : analyse en composantes principales

Dans le même ordre d'idée que l'utilisation des doigts virtuels, il est possible de « réduire » les DDL réels d'une configuration de prise vers un petit nombre de DDLe, en lui appliquant un outil de régression tel que l'analyse en composantes principales (*Principal Component Analysis*, PCA). L'objectif de la PCA est de pouvoir appréhender de manière simple des problèmes à nombreuses dimensions sans perdre pour autant la signification des mesures.

Ce type de traitement va examiner une base de données, constituée d'un nombre quelconque de variables et de mesures de ces variables, et déterminer dans quelle mesure ces données sont corrélées entre elles. Pour cela il va chercher à trouver les « axes porteurs » de la base comme étant ceux autour desquels l'inertie du nuage de points constitué par les variables mesurées sera minimale ; ainsi, la projection des points sur ces axes sera la plus proche possible des points originaux, et donc en sera la mieux représentative (Duby et Robin 2006).

Parmi plusieurs études (Santello et Flanders 1998, Ingram, et al. 2008, Thakur, Bastian et Hsiao 2008), celle menée par Santello et ses collègues nous montre ainsi qu'il est possible, dans une certaine mesure, d'exprimer la configuration de la main entière suivant deux axes principaux (voir

Figure I-20). Cette étude a été menée sur cinq sujets, auxquels il était demandé de conformer leur main droite comme s'ils devaient attraper toute une gamme d'objets (57 en tout). Ces mouvements

étaient mesurés par un gant instrumenté portant 15 capteurs situés au niveau des articulations (Cyberglove, voir Chap. V), et chaque objet était « saisi » 5 fois. De ces mesures les auteurs ont tiré jusqu'à six composantes principales, les trois premières représentant environ 90% de la variance des données et les deux premières 84% environ. Même si l'implémentation physique de tels résultats est possible et plutôt satisfaisant (Brown et Asada 2007), il serait faux de penser que seuls deux DDLé suffisent à caractériser une configuration de saisie ; les auteurs suggèrent que si les premières composantes donnent à la main une configuration globale, les suivantes (« haut-niveau ») interviennent dans la précision et la finesse de la saisie.

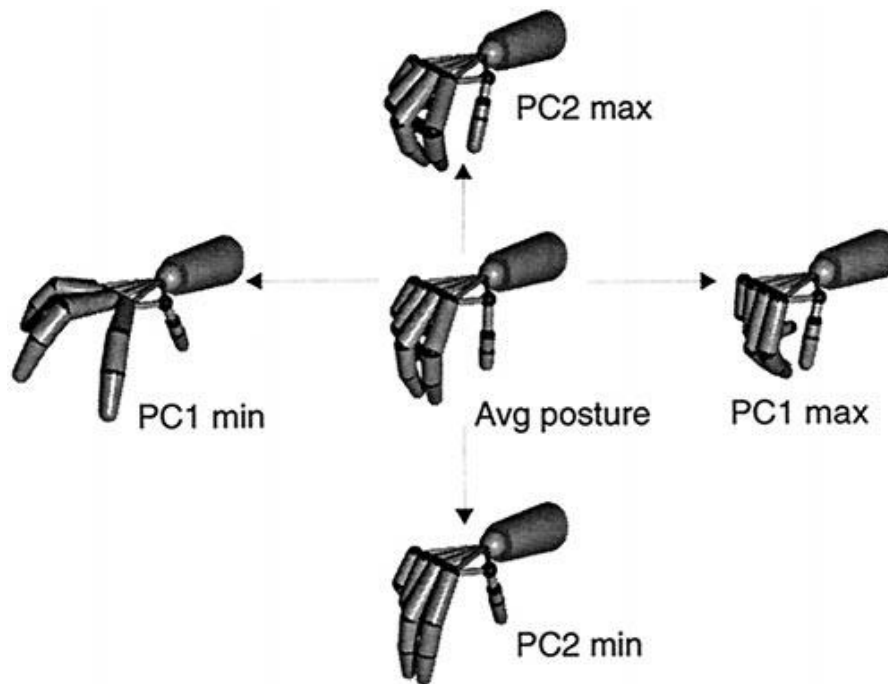


Figure I-20. Les deux premières composantes d'une analyse en composantes principales effectuée sur une gamme de mouvements de saisie permettrait d'expliquer ces mouvements à plus de 80%. D'après (Santello et Flanders 1998)

II. Les mains mécaniques

Cette partie présente un état de l'art orienté des mains mécaniques présentes dans le domaine robotique, ainsi que les différents schémas de contrôle inspirés du vivant que l'on peut y trouver.

1. Etat de l'art orienté.

Dans le domaine de la conception mécanique - celle des mains robotiques en particulier- la plupart des travaux effectués sont axés sur les performances des effecteurs en termes de forces appliquées, de stabilité de prise, de caractéristiques cinématiques et dynamiques (Bicchi et Kumar 2002). Si ces critères sont indispensables du point de vue du contrôle ils ne permettent en rien d'évaluer la proximité des mains mécaniques considérées par rapport à leur homologue biologique.

A ce jour une seule étude de revue (Biagiotti, et al. 2002) s'est intéressée à cette évaluation et propose de jauger les effecteurs en fonction de deux points d'accroche principaux, eux-mêmes subdivisés en plusieurs facteurs : i) le niveau d'anthropomorphisme de la main et ii) sa dextérité potentielle.

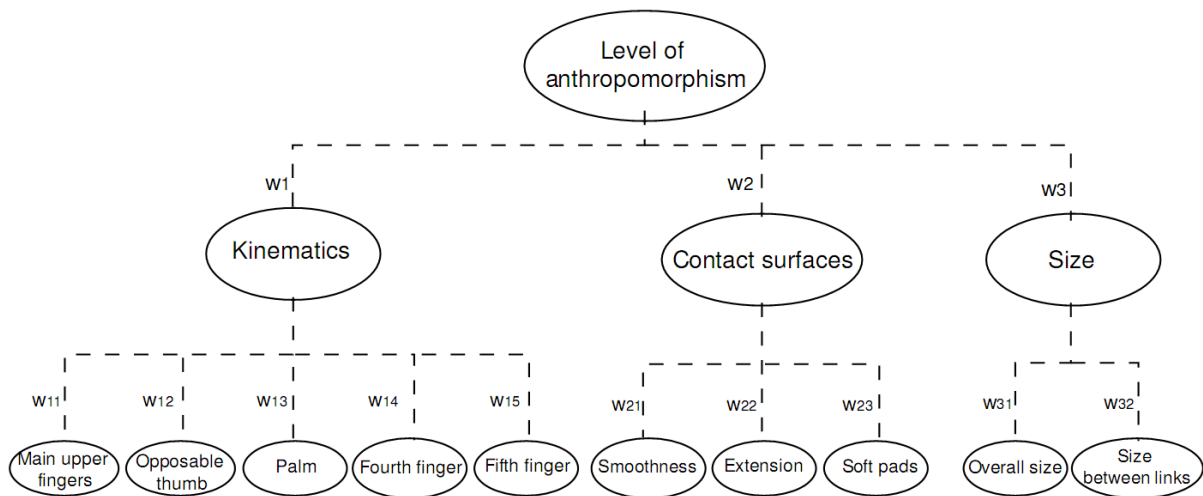


Figure II-1. L'évaluation du niveau d'anthropomorphisme d'une main mécanique proposée par Biagiotti et al. dans (Biagiotti, et al. 2002). La cinématique de la main mais aussi sa taille et ses surfaces de contact sont prises en compte afin de déterminer à quel point elle se rapproche de la main humaine.

Il est intéressant de noter que dans leur évaluation du niveau d'anthropomorphisme d'une main mécanique les auteurs prennent en compte aussi bien sa cinématique générale que sa taille par rapport à la main humaine, ou encore le nombre de doigts implémentés (voir Figure II-1), critères qui ont naturellement été adoptés dans nos propres travaux (voir chapitres III et IV).

Concernant la dextérité potentielle, les auteurs la mettent en relation avec les deux aspects fondamentaux de la main (à savoir l'action et la perception, voir Introduction) en examinant la capacité de la main à saisir et manipuler les objets d'une part, et son appareillage sensoriel d'autre part. Si le premier aspect est considéré de manière courante dans la conception des différentes mains que nous allons voir, le deuxième est la plupart du temps relégué au second plan de par la difficulté d'intégration des capteurs de technologie actuelle ; nous sommes encore loin d'égaliser les possibilités sensorielles de la main humaine, même si certaines études récentes semblent aller dans ce sens (Fishel et Loeb 2012).

Nous allons ci-après présenter quelques-unes des mains mécaniques qui ont marqué l'évolution de ce domaine de recherche en mettant l'accent sur leurs ressemblances avec la main humaine. Elles sont pour la plupart développées par des laboratoires et cantonnées à des applications de recherche, exception faite de celles faisant office de prothèses dans le milieu médical.

Il est en effet malaisé de trouver des mains mécaniques destinées à des applications industrielles ; cette catégorisation n'aurait pas grande signification puisque malgré les volontés affichées en ce sens

aujourd'hui aucune main mécanique n'est intégrée à un *process* industriel ; ce sont au mieux des *grippers* dépassant la simple pince en utilisant plus de deux branches et plusieurs articulations par branche, mais la relation avec la main humaine est ici assez ténue. La raison à cela tient au contrôle des mains mécaniques et au respect des temps de cycles inhérents aux processus industriels : plus une main artificielle se rapproche des capacités d'adaptation et de la structure complexe de la main humaine et plus elle devient difficile à contrôler de manière efficace. Ainsi on retrouvera plus facilement dans l'industrie un robot porteur manipulant cinq outils différents (typiquement des pinces à souder de diamètres et configurations variables, pour l'exemple d'un robot d'assemblage automobile ; voir figure 0-2) plutôt qu'un outil plus complexe dont la versatilité lui permettrait d'effectuer toutes ces tâches. De plus, si l'on considère la main comme le « proto-outil » qui permet à l'homme d'intégrer à son corps tout objet qu'il saisit afin de l'utiliser (comme défini dans l'Introduction), quelle serait la réelle différence entre ce proto-outil et l'attache pneumatique dudit robot industriel, les deux lui permettant de saisir les différents outils dont il a besoin ?

Le fait est qu'il n'existe à ce jour qu'une très faible demande (et finalement, un faible intérêt, selon Folgheraiter et Gini 2000) pour l'intégration d'une main robotisée dans l'industrie, où cette capacité d'adaptation serait un pré-requis indispensable ; on citera par exemple le conditionnement ou le tri d'objets hétéroclites, chacun nécessitant un effecteur qui lui serait propre.

a) Les mains mécaniques dans la recherche : un moyen de mieux comprendre la main humaine.

Comme il a déjà été évoqué dans l'Introduction, l'implémentation même partielle d'un système biologique dans un artefact créé par l'homme lui permet avant tout de saisir comment fonctionne le système initial ; en-dehors de la compréhension nécessaire à la simple copie, ce processus fait fréquemment émerger des caractéristiques non perçues au départ. Ainsi, le développement et l'utilisation de mains artificielles dans la recherche nous a permis de comprendre la logique derrière une telle organisation anatomique, ses boucles de contrôle, ses redondances, tous les éléments qui nous sont nécessaires pour arriver à un contrôle aussi fin. En nous appuyant sur la notation proposée par Biagiotti et ses collègues (Biagiotti, et al. 2002), nous allons examiner l'apport des différents « niveaux » des mains mécaniques présentes dans le domaine de la recherche.

i) Peu ou pas de ressemblance avec la main humaine (score <0,5)

Le premier effecteur que nous souhaitons présenter est très loin de la main humaine, à vrai dire il ne l'évoque même pas. Il s'agit de l'*Universal Gripper* du laboratoire Connell Creative Robots (Brown, et al. 2010); il est constitué d'un sac rempli de particules d'environ 1mm de diamètre et fixé à l'extrémité d'un bras mécanique (voir figure 0-2). Malgré sa fonctionnalité sommaire il permet de saisir et déplacer un grand nombre d'objets hétéroclites, grâce à l'agglomération des particules : une fois le coussin mis en contact avec l'objet le vide est fait à l'intérieur du sac, ce qui a pour effet de rigidifier l'ensemble et de verrouiller l'objet dans la « main » ; on peut ainsi saisir un œuf, un ressort, un verre... Il est même possible, en injectant à nouveau de l'air, de lancer l'objet. Bien entendu aucune manipulation n'est possible avec ce type d'effecteur.

Nous trouvons ensuite des *grippers* qui s'inspirent partiellement de la main humaine, comme la *Barrett Hand* (Townsend 2000). Elle constitue un bon exemple de bio-inspiration lointaine : constituée de trois doigts de deux phalanges chacun, elle n'a pas de pouce opposable ; le doigt central est fixé à la base servant de paume tandis que les deux autres peuvent tourner autour afin de produire une gamme de saisies variée (voir Figure II-2). Les articulations de cette main sont sous-actionnées (8DDL dont 4 contrôlables), elle ne peut effectuer que des prises en force et pas de manipulation (voir Figure II-2, a).

Il est intéressant de constater qu'une autre « main » du même type a vu le jour peu après : *High Speed Multifingered Hand* (Namiki, et al. 2003, Shiokata, Namiki et Ishikawa 2005) (voir Figure II-2, b). Si la structure mécanique est la même que pour la *Barrett Hand*, cet effecteur-ci est doté d'un actionnement complet par des moteurs pouvant développer un couple important sur un temps très court ; couplé à un système de contrôle ultra-rapide développé lui aussi par le laboratoire, ce système peut effectuer des tâches d'une qualité rarement atteinte à ce jour, comme attraper un objet au vol en prise de précision, utiliser des pincettes pour déplacer un très petit objet, faire un nœud ou encore jongler avec une balle ou une baguette (Shiokata, Namiki et Ishikawa 2005). Il constitue un excellent exemple du rôle que peut jouer un contrôle performant sur l'efficacité d'une architecture mécanique, même si elle ne présente que peu de similitude avec la main humaine.

D'autres projets, comme la *Darmstadt Hand* (Paetsch et Kaneko 1990, Paetsch et Wichert 1993) (Figure II-2, c) ou encore la *TUM Hand* (Pfeiffer 1996) prouvent que ce type d'architecture, malgré sa distance de la main humaine, offre un bon nombre de possibilités. On y voit aussi apparaître l'utilisation de tendons afin de sortir les actionneurs de l'effecteur lui-même et ainsi limiter son encombrement. Cette caractéristique se généralisera ensuite dans la plupart des mains mécaniques que nous citerons ici, et ce malgré les difficultés que cela peut induire au niveau du contrôle (Gazeau 2000).

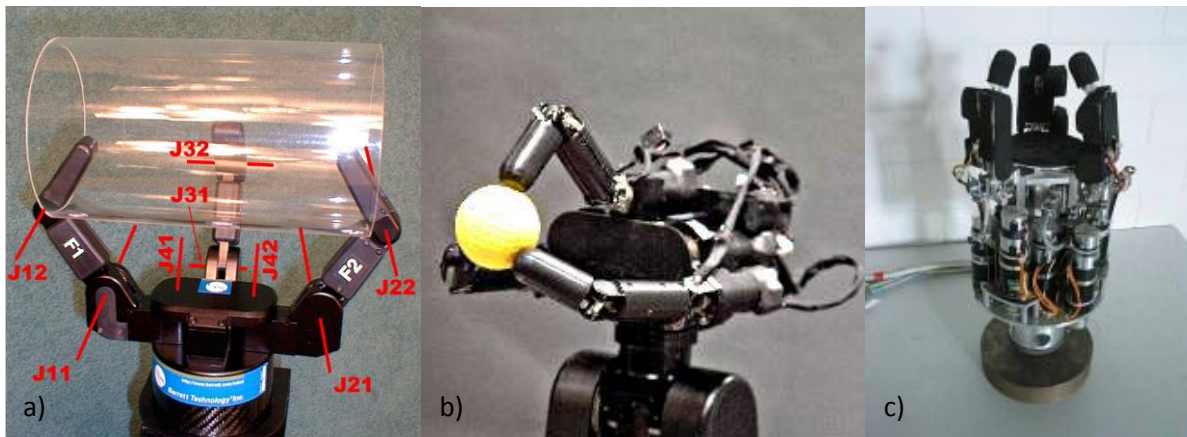


Figure II-2. Trois grippers présentant une bioinspiration limitée : a) la *Barrett Hand* (Townsend 2000), b) la *High Speed Multifingered Hand* (Namiki, et al. 2003), c) la *Darmstadt Hand* (Paetsch et Kaneko 1990). La structure de ces trois effecteurs est similaire et présentée en a) : chaque doigt comporte 2 DDL, plus deux permettant l'ouverture de la main.

L'adoption d'un pouce opposable constitue un pas en avant non négligeable dans l'anthropomorphisme, même si le niveau de la *Stanford/JPL Hand* (Salisbury 1985) est encore discutable. Elle ne dispose que de trois doigts, tous identiques : deux phalanges seulement et 3ddl par doigt, un en abduction et deux en flexion ; ils sont implantés de manière à reproduire la prise en tripode mettant en jeu le pouce, l'index et le majeur. Elle ne possède pas de paume et ne peut effectuer de manipulation avec remplacement des doigts, mais est cependant équipée de capteurs tactiles en plus de capteurs de position et de tension des tendons.

Si l'on ajoute aux deux doigts de la *Stanford/JPL Hand* les phalanges qui leur manquent nous obtenons l'*Okada Hand* (Okada 1982), au moins du point de vue cinématique. Celle-ci a clairement été développée dans le but d'imiter la main humaine et ce malgré sa taille et le fait qu'elle ne possède que trois doigts. Plusieurs tâches de saisie et manipulation ont été réalisées avec cette main, notamment le vissage d'un écrou (Okada 1982), ce qui représente encore aujourd'hui une tâche non triviale (Saut, Sahbani et Perdereau).

ii) Une implémentation incomplète (0,5<score<0,7)

En poursuivant l'intégration de fonctionnalités propres à la main humaine, nous pouvons arriver à des modèles hybrides entre un « simple » *gripper* industriel et une main réellement dextre. Ces chaînons manquants peuvent paraître étranges, car s'ils s'inspirent du modèle biologique ils n'en reprennent qu'une vue incomplète ou peu efficace.

C'est typiquement ce que montre la main *TUAT/Karlsruhe* (Fukaya, et al. 2000) : elle possède bien cinq doigts, implantés de manière correcte et possédant 24 DDL (ce qui est supérieur à toutes les autres mains présentées ici). Cependant toutes ces articulations ne sont actionnées que par un seul moteur, ce qui lui permet certes d'empaumer des objets par compliance mais en aucun cas de réaliser des tâches de manipulation (voir Figure II-3, a).

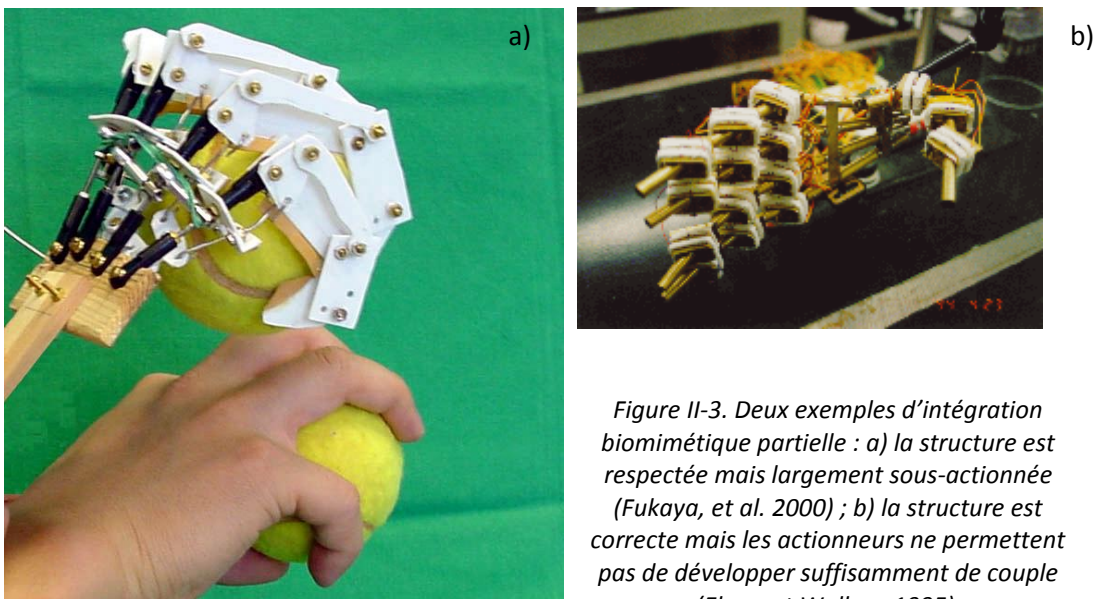


Figure II-3. Deux exemples d'intégration biomimétique partielle : a) la structure est respectée mais largement sous-actionnée (Fukaya, et al. 2000) ; b) la structure est correcte mais les actionneurs ne permettent pas de développer suffisamment de couple (Ebner et Wallace 1995).

Dans un autre registre, les créateurs de la *Direct-Drive Hand* développée dans les années 1990 (Ebner et Wallace 1995) ont choisi de reprendre partiellement l'organisation de la main à cinq doigts en implémentant un actionnement direct au niveau des flexions par montage électromagnétique (Figure II-3, b). Ces actionneurs, intéressants de par leur rapidité, ne développent qu'un couple très faible et présentent un taux d'encombrement assez élevé. Ce projet n'a semble-t-il pas été poursuivi.

iii) **Une ressemblance et une dextérité accrues (0,7<score<0,9)**

Il est couramment admis dans le domaine robotique que si trois doigts suffisent à saisir un objet de manière stable, quatre sont nécessaires si l'on souhaite de le manipuler (Gazeau, et al. 2002). Les effecteurs que nous allons aborder ici ont été développés dans cette optique, et possèdent donc tous au moins les quatre premiers doigts (tous sauf l'auriculaire).

Un très bon exemple de ce genre d'architecture est formé par le trio *Utah Hand* (Jacobsen, et al. 1986), *LMS hand* (Gazeau, et al. 2002) et *DIST hand* (Caffaz et Cannata 1998). Ces trois mains ont explicitement été créées pour étudier la manipulation d'objets ; elles possèdent toutes trois une architecture de 4 DDL par doigt contrôlables individuellement par une transmission à l'aide de tendons ; leurs doigts longs sont identiques entre eux, et leur pouce est implanté de manière à faciliter l'opposition.

La première, développée par Jacobsen et son équipe dans les années 1980 (Jacobsen, et al. 1986) est actionnée par des muscles pneumatiques. Son encombrement est globalement celui d'une main humaine (actionneurs exclus), et sa dextérité a permis de poser les bases des travaux sur la manipulation d'objets en prise de précision tels que ceux effectués à l'Institut Pprime (*LMS hand*, voir Figure III-5) ou à l'université de Gênes (*DIST Hand*, Figure II-4, a). Il est d'ailleurs intéressant de constater que la *main LMS* semble être une prolongation de l'*Utah Hand* tant elles se ressemblent, la plus récente étant bien mieux instrumentée cependant puisqu'équipée de capteurs de position au niveau des moteurs et des articulations, ainsi que de capteurs d'étirement des tendons en plus de ceux de contact. La *DIST Hand* quant à elle possède des capteurs de force 3 axes en bout de doigts, ce qui a facilité la caractérisation des interactions avec les objets saisis.

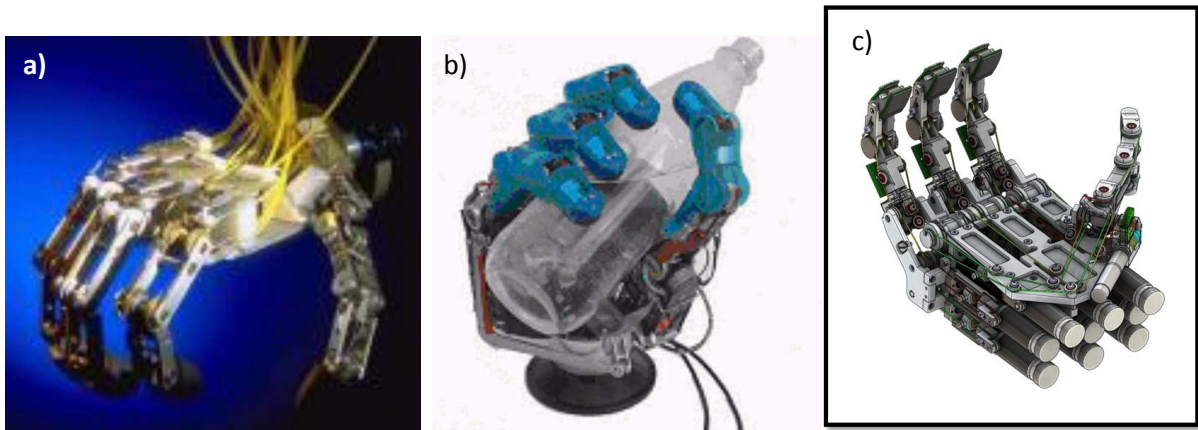


Figure II-4. Trois exemples de mains à quatre doigts utilisant des techniques d'actionnement différentes : a) la *DIST Hand* (Caffaz et Cannata 1998) actionnée par des moteurs tirant sur des tendons, b) la *DLR Hand II* (Butterfass, et al. 2001) utilisant des liaisons mécaniques classiques mis avec un étage de réduction harmonic drive, c) la main *ABILIS*, actionnée par des vérins à câbles dont le mouvement est transmis par des tendons.

Une autre main à quatre doigts remarquable est la main *DLR II* (Butterfass, et al. 2001), qui reprend les réductions *harmonic drive* si répandues dans la robotique industrielle (Figure II-4, b). Celles-ci permettent une grande précision dans le positionnement mais impliquent un dimensionnement supérieur des moteurs (cette main est en effet très grande comparée à la main humaine). Cette main propose une architecture de 17DDL pour 13 contrôlés, la dernière phalange de chaque doigt étant couplée à la précédente ; elle est en outre très bien instrumentée : elle est équipée de capteurs de position et de couple au niveau des articulations, ainsi que des capteurs de force 6 axes embarqués en bout de doigts.

L'un des aspects du projet qui a porté ce travail de thèse était de développer une main de nouvelle génération, tant du point de vue de l'actionnement que de l'instrumentation. La *main ABILIS* est née du travail du consortium autour de cet objectif (voir Figure II-4, c pour une vue CAO). Elle possède quatre doigts dont trois identiques (doigts longs) complètement actionnés par un système de vérins à câbles (16DDL dont 13 réversibles). Outre cela elle présente une grande modularité : chaque doigt constitue une unité qui peut être facilement désolidarisée du reste de la main et ainsi remplacée ou testée. Elle est équipée de capteurs de position, de force au niveau des moteurs et devrait recevoir des matrices de contact à communication sans fil. Son développement est encore en cours à ce jour.

Nous pouvons aussi trouver de nombreuses mains à cinq doigts, leurs constructeurs ayant décidé de coller encore un peu plus à la réalité biologique. Outre la *TUAT/Karlsruhe* dont nous avons déjà parlé nous pourrions ainsi citer la *Belgrade/USC hand* qui représente un bel effort d'intégration malgré son large sous-actionnement (18DDL pour 4 contrôlés) (Shastri et Iberall 1990) ou encore l'*UB Hand III* (Lotti, et al. 2005), évolution d'une main à trois doigts.

Celle-ci présente l'originalité de se servir de segments reliés par des structures déformables en guise d'articulations (voir Figure II-5, a). Ils sont actionnés par des tendons dont l'implantation reprend en partie celle des fléchisseurs de la main humaine, et ont été testé par les auteurs sur plusieurs types d'actionneurs (moteurs, muscles pneumatiques, ...). D'un bon potentiel au niveau cinématique (15 DDL contrôlés pour 19 DLL en tout), cette main pose par contre plusieurs problèmes quant à son instrumentation, le principal étant la mesure des angles d'articulation. Ceux-ci sont répartis sur la longueur des éléments déformables et non centrés ; par conséquent on ne peut utiliser de potentiomètres (ou autres solutions équivalentes classiques) pour les mesurer. Après avoir essayé plusieurs solutions les auteurs ont fini par implémenter des jauges de contraintes sur les tendons, qui couplés aux capteurs de position des moteurs fournissent un contrôle adéquat.

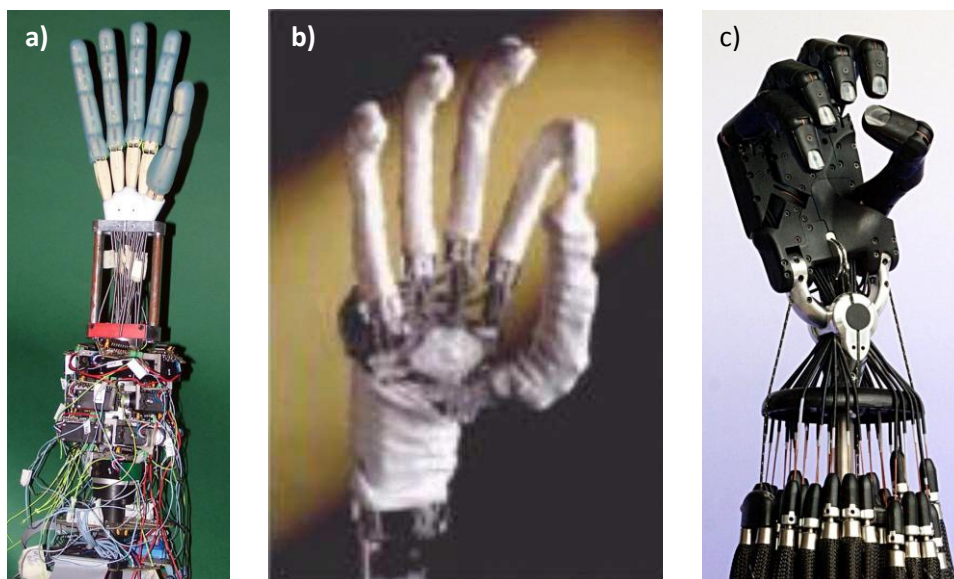


Figure II-5. Trois exemples de mains à cinq doigts présentant différentes solutions d'intégration : a) l'*UB Hand III* (Lotti, et al. 2005) dont les doigts sont constitués d'une alternance d'éléments rigides et déformables, b) l'*Ultralight Hand* (Schulz, Pylatiuk et Bretthauer 2001) dont les actionneurs pneumatiques sont entièrement intégrés, c) la *Shadow Hand* (ShadowRobotCompany 2010) dont la conception et le mode d'actionnement la rapprochent très fortement de la main humaine.

Autre main à cinq doigts ayant un fort potentiel mais dont le développement semble à l'abandon depuis quelques années, l'*Anthrobot* (Kyriakopoulos, et al. 1997) souffre cruellement d'instrumentation. Les seuls capteurs que l'on va y trouver sont ceux équipant les servomoteurs, qui servent à contrôler 16 articulations sur les 20 au total (les dernières phalanges des doigts longs étant couplées aux médianes) grâce à des tendons en montage antagoniste. Prévue à l'origine pour la téléopération, il semble que la réalisation d'une tâche par un opérateur distant se soit avérée trop difficile sans plus de retour sensoriel.

Les deux dernières mains entrant dans cette catégorie sont l'*Ultralight Hand* de l'institut Karlsruhe (Schulz, Pylatiuk et Bretthauer 2001) et la *Shadow Hand* (ShadowRobotCompany 2010). Toutes deux présentent la particularité de fonctionner avec des actionneurs pneumatiques, qu'ils soient intégrés dans la main (*Ultralight Hand*, Figure II-5, b) ou déportés sous le poignet via des tendons (*Shadow Hand*; bien qu'elle puisse être équipée de moteurs désormais). Ceci leur permet à la fois de développer un fort couple et d'être souple, de pouvoir s'adapter à l'objet; par contre cela induit une modélisation et un contrôle du mouvement plus délicats. La comparaison entre ces deux effecteurs s'arrête cependant là, la *Shadow Hand* étant à la fois mieux instrumentée (capteurs de position et de force, matrice de contact et/ou de force au bout des doigts) et bien plus polyvalente que l'*Ultralight Hand*. C'est d'ailleurs la seule main actuelle permettant de contrôler non seulement toutes les articulations des doigts, mais aussi deux des trois mouvements du poignet et un DDL simulant l'arche palmaire (voir Figure II-5, c).

iv) Des capacités au plus proche de la main humaine (score>0,9)

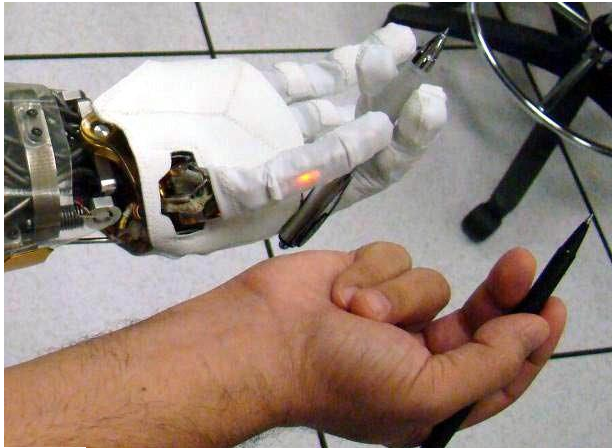
Cette dernière catégorie comprend les mains mécaniques qui ont repoussé encore un peu plus loin les limites du domaine, en développant chacune un aspect propre à la main humaine.

La première est la *Gifu Hand III* (Tetsuya, et al. 2002), qui si elle reprend une implantation classique de 16DDL contrôlés pour 20 au total n'en constitue pas moins une révolution au niveau de l'intégration. Équipée de pas moins de 859 capteurs tactiles répartis sur la main (313 sur la paume, 126 sur le pouce, 105 sur chaque doigt long) ainsi que de capteurs de position sur les moteurs et d'autres de force en bout de doigts (6 axes), elle est à ce jour la main artificielle la plus proche de l'humain du point de vue de l'instrumentation.



Figure II-6. La *Gifu Hand III* nue (modèle de gauche) et couverte par son réseau de capteurs de contact (modèle de droite) (Tetsuya, et al. 2002).

Concernant la polyvalence et la robustesse nous trouvons la main *Robonaut II* (Diftler, et al. 2011), développée par la NASA pour être embarquée sur le robot éponyme et qui a finalement été envoyée sur la Station Spatiale Internationale en 2011. Cette main représente un excellent équilibre entre une structure cinématique correcte (19 DDL dont 13 contrôlés, avec une emphase sur le trio pouce-index-majeur qui comprennent chacun respectivement quatre, trois et trois DDL contrôlables individuellement ; les autres doigts servant de verrous pour les prises en force), une instrumentation étendue (capteurs de position sur les articulations et les moteurs, jauges de contraintes sur les tendons de transmission, capteurs de contact intégrés sur toute la surface du gant de protection, capteur de force 6 axes pour l'extrémité des doigts) et une excellente conception (intégration, robustesse, espace de travail très proche de celui de l'homme).



a)



b)

Figure II-7. Deux mains complètes au plus proche de la réalité biologique : a) la main du *Robonaut II* par son efficacité, sa versatilité et sa robustesse (Diftler, et al. 2011), b) et *Blackfingers Hand* par sa conception (Folgheraiter et Gini 2000).

Enfin, nous pouvons examiner la *Blackfingers Hand* (Folgheraiter et Gini 2000) qui, bien qu'elle soit loin des capacités de la *Robonaut Hand*, ne lui est pas moins supérieure en termes d'anthropomorphisme. Sa structure est en effet très fortement bio-inspirée: les segments qui la composent sont sculptés pour reprendre la forme des os humains ; les articulations sont constituées non pas de liaisons mécaniques classiques mais de surfaces de contact, encapsulées dans des ligaments artificiels ; son actionnement est assuré par des tendons que viennent contraindre des muscles pneumatiques développés par l'équipe (la première version utilisait des muscles hybrides pneumatique/hydraulique). Seule entorse à la réalité biologique : la flexion de la phalange médiane des doigts longs est dépendante de celle de la phalange distale (et non l'inverse, comme nous avons pu le voir à de nombreuses reprises jusqu'à présent). Chaque doigt est ainsi contrôlé par un jeu de six tendons / muscles antagonistes dotés de capteurs d'étirement. C'est à ce jour le modèle le plus proche de la main humaine, même s'il lui manque une réelle instrumentation (contacts et forces en surface) afin de le rendre contrôlable autrement qu'en boucle ouverte, ainsi qu'un revêtement lui permettant d'être tout simplement utilisable.

b) Les mains mécaniques dans le domaine médical.

S'il est un domaine où le biomimétisme revêt une importance capitale, c'est celui de la prothétique. Ici le problème est totalement inversé : on ne cherchera pas forcément à obtenir des résultats les plus précis possible ni même identifiables mathématiquement, mais à permettre au sujet lésé de retrouver autonomie et confort de vie. Il est d'ailleurs édifiant de constater qu'il n'est pas rare qu'après un temps d'essai certains patients rejettent une prothèse myoélectrique évoluée technologiquement pour reprendre leur ancienne prothèse, beaucoup plus « simple » mais plus facile à appréhender, voire abandonnent complètement toute supplémentation, se sentant simplement plus fonctionnels sans prothèse (voir (Biddiss et Chau 2007) pour un exposé très complet des nombreuses causes de rejet des prothèses du membre supérieur). A l'inverse, d'autres études montrent que les sujets peuvent très bien accepter plusieurs prothèses et même plusieurs types d'actuation, qu'ils utiliseront en fonction des tâches qu'ils souhaitent effectuer (Millstein, Heger et Hunter 1986). Si l'on ajoute à cela les sujets qui « sentent » ce qui se passe dans un artefact en caoutchouc placé dans leur champ de vision (Ehrsson, et al. 2008) on ne peut que constater toute la versatilité de la relation au corps et sa représentation par le cerveau humain, et donc les possibilités de la recherche en ce domaine.

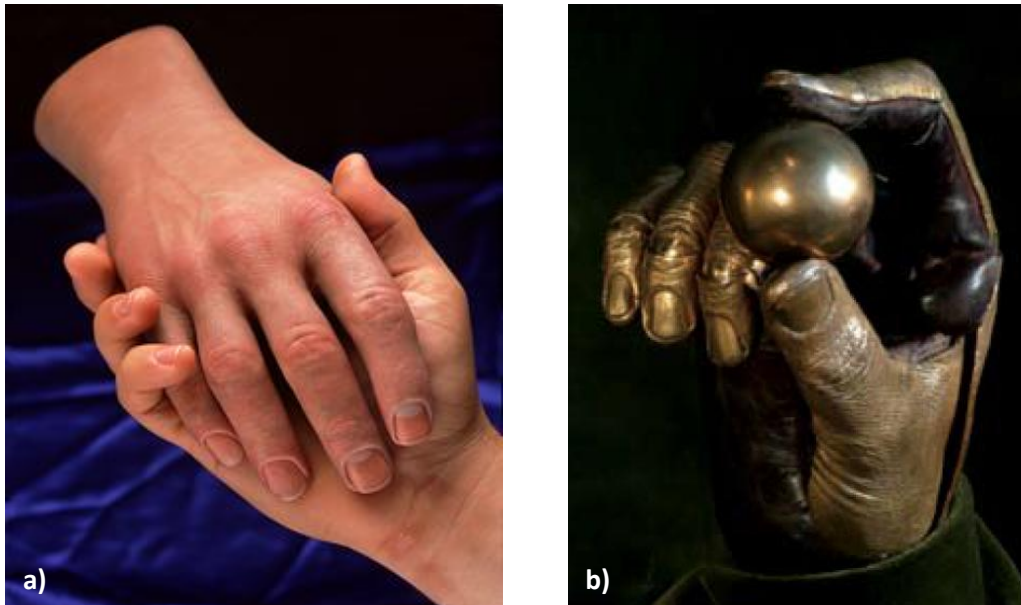


Figure II-8. L'impact esthétique des prothèses peut être de première importance pour les patients lésés. a) prothèse passive en silicone, reproduisant l'aspect de la main restante (RealLifeSkin). b) main « Monestier-Lescoeur », à la frontière entre prothèse active et œuvre d'art ; actionnée par un câble entre les épaules et naturellement compliant (Monestier 2009).

Les différentes prothèses peuvent être classées en fonction de leur actuation et de leur mode de commande :

1. Passives ; elles ne servent que dans un but esthétique, afin de faciliter les relations sociales.
2. Actives ; elles permettent de saisir des objets et d'effectuer des tâches.
 - a. Actionnées via un report des mouvements du sujet (comme la tension de câbles par enroulement des épaules, par exemple)
 - b. Dotées d'actionneurs propres (moteurs, muscles pneumatiques, segments d'alliage à mémoire de forme, ...)
 - i. Contrôlées par système externe (boutons-poussoirs permettant de changer de configuration)
 - ii. Interfacées avec les signaux biologiques du sujet ou « myoélectriques » (contrôle par lecture d'électromyogrammes de surface ou intramusculaires, signaux corticaux, ...).

Nous n'allons traiter ici que la catégorie 2.b : les prothèses actives possédant leurs actionneurs embarqués ; nous allons ainsi examiner les mains myoélectriques les plus connues et les plus avancées à ce jour. Toutes ces prothèses sont bien entendu équipées de gants reproduisant l'aspect de la peau du sujet pour garantir l'illusion.

i) Le passage au contrôle myoélectrique: un développement axé sur le patient

Comme énoncé précédemment, beaucoup de personnes handicapées utilisent plusieurs prothèses différentes, en fonction du contexte dans lequel elles se trouvent et de ce qu'elles souhaitent faire (on notera au passage la ressemblance avec la notion d'outil unique largement utilisée par l'industrie ; voir section I). Il est donc indispensable, lorsque l'on développe une prothèse, de prendre en compte les habitudes des patients et de faire en sorte que les nouveautés apportées par une nouvelle main artificielle puissent se fondre dans ce canevas. C'est pour cela que l'on peut trouver de nombreux modèles de mains myoélectriques reprenant peu ou prou l'architecture d'une main à câbles contrôlable par enroulement d'épaule, et où la rotation des moteurs viendra simplement remplacer la tension des câbles.

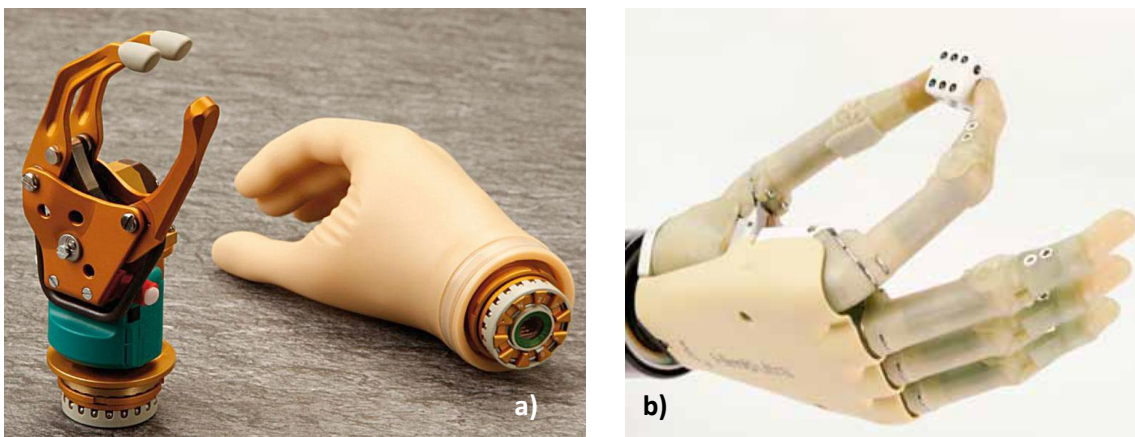


Figure II-9. Deux types de prothèses myoélectriques efficace malgré leurs fonctionnalités limitées : a) la SensorHand Speed (OttoBock, SensorHand Speed datasheet 2012) et b) l'I-Limb ultra (TouchBionics).

La plus répandue et connue à l'heure actuelle est la *SensorHand Speed*, fabriquée et commercialisée par la société Otto Bock (OttoBock, SensorHand Speed datasheet 2012). Sa simplicité cinématique alliée à une volonté affichée par le constructeur en termes d'efficacité et d'apparence en font un très bon outil permettant de tester la commande myoélectrique. Dans ce sens, elle a été développée de manière à être pilotable par plusieurs combinaisons d'électrodes différentes et sa vitesse est réglable par l'utilisateur. Ainsi, malgré le fait qu'elle ne permette d'effectuer « seulement » qu'une prise en tripode à deux doigts virtuels (le pouce d'un côté, l'index et le majeur de l'autre ; le reste des doigts étant couplés pour l'esthétisme ; voir Figure II-9, a), elle est largement tolérée et utilisée.

A un degré technique supérieur nous trouvons des prothèses comme l'*I-Limb ultra* (Figure II-9, b) et leur pendant les *I-Limb digits* (TouchBionics), la première venant suppléer la perte d'une main entière tandis que les seconds pourront remplacer n'importe quelle combinaison de doigts manquants. L'*I-Limb ultra* est équipée d'un moteur par doigt long pour réaliser des mouvements de flexion individuels ; son pouce n'est pas motorisé mais peut être manuellement positionné en « ouverture » ou en « opposition ». Elle est elle aussi pilotable par diverses combinaisons d'électrodes cutanées mais aussi par des capteurs de force (FSR) ; elle peut adopter sept positions différentes, avec des variantes (Waryck 2011) mais pas de réelle prise en force malgré le fait qu'elle puisse développer une force allant jusqu'à 136N.

ii) Vers une plus grande polyvalence

La main artificielle la plus polyvalente à ce jour est commercialisée par la société RSL Steeper : la *BeBionic v2* (BeBionic 2012) propose en effet pas moins de 14 configurations différentes, avec un réel souci de soutien du patient dans sa vie quotidienne (position d'utilisation d'une souris ou d'un pulvérisateur, par exemple ; voir Figure II-10). Le pouce de cette prothèse peut lui aussi être placé manuellement en deux positions mais sa flexion comme celle des autres doigts est cette fois motorisée, ce qui est l'un des facteurs de sa versatilité. Malgré cela elle est pilotable par l'utilisation d'une simple paire d'électrodes classique, à travers un schéma de commande hiérarchique adaptable au patient : le premier étage est déterminé par la position du pouce, complété ensuite par une combinaison de contractions ou cocontractions des muscles ; il est aussi possible d'utiliser un bouton situé sur le dos de la main (Waryck 2011).

Un autre exemple d'amélioration structurelle significative est porté par la *Michelangelo hand* (OttoBock, Axon-Bus Prosthetic System with Michelangelo Hand). Bien qu'étant sous-actionnée elle permet un contrôle actif du pouce, et utilise les mouvements d'abduction/adduction des doigts longs afin de proposer des saisies interdigitales parmi les sept configurations prévues. Elle peut en outre développer une force de serrage allant jusqu'à 100N ce qui, couplé avec une compliance induite par la structure de ses doigts, en fait un outil particulièrement efficace.

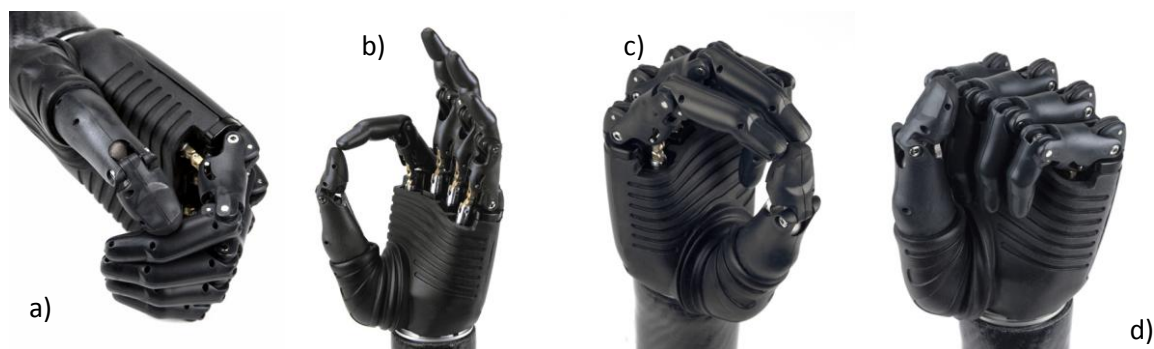


Figure II-10. Quatre des quatorze configurations préprogrammées de la main BeBionic v2 (Waryck 2011) : a) prise latéro-pulpaire ; b) prise de précision ; c) prise en tripode ; d) prise en force.

iii) Vers une communication bilatérale

Si les performances des mains présentées ci-dessus sont bonnes d'un point de vue cinématique elles n'en sont pas moins limitées à un schéma de contrôle réduit car ne s'appuyant que sur un retour visuel. En se remémorant que chez l'homme la modalité visuelle est avant tout une façon d'estimer la solution au problème de saisie tandis que la proprioception et l'haptique lui permettent d'ajuster cette estimation à parti du contact (voir chapitre I) on comprendra de suite que le handicap ne saurait être totalement compensé sans utilisation de ses modalités. C'est précisément sur ce point que portent quelques études récentes (Kuiken, Dumanian, et al. 2004, Kuiken, Marasco, et al. 2007, OttoBock, The Feeling Hand Prosthesis) dont nous voyons aujourd'hui les résultats : la communication bilatérale avec une prothèse est possible, les sensations liées à la manipulation d'objets peuvent être rendues –au moins partiellement- à quelqu'un qui a perdu une main.

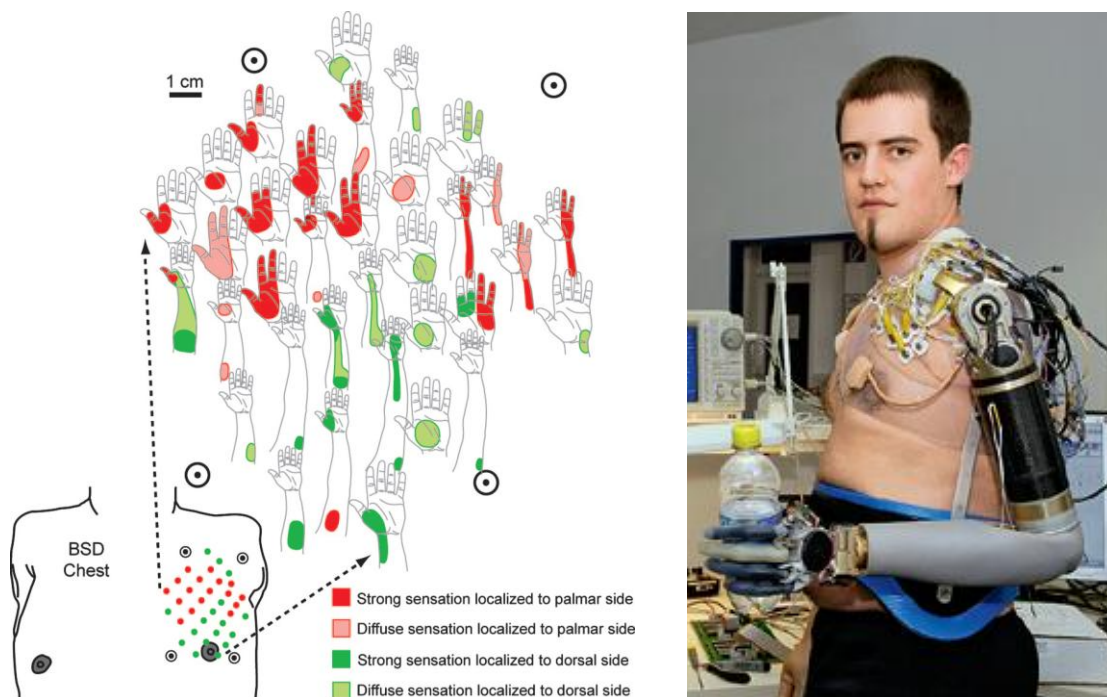


Figure II-11. La réinnervation du muscle pectoral par rabattage des nerfs du bras y dessine une nouvelle carte sensorimotrice (panneau de gauche tiré de Kuiken, Marasco, et al. 2007). Celle-ci permet alors non seulement de contrôler de manière spécifique les différents segments de la prothèse mais aussi de pouvoir ressentir les objets touchés par propagation des signaux des capteurs. A droite, un patient sur lequel cette intervention a été pratiquée (OttoBock, The Feeling Hand Prosthesis)

Le processus est bien entendu long et contraignant : la première étape consiste à détourner les nerfs du bras afin de les réimplanter au niveau du muscle pectoral par voie chirurgicale. Même si les premières manifestations dues à ce rabattage vont être visibles un mois environ après l'intervention et les premiers mouvements quatre mois après, la réinnervation de la zone va prendre plusieurs années pour être efficace (OttoBock, The Feeling Hand Prosthesis, Kuiken, Marasco, et al. 2007). A la fin c'est une véritable nouvelle carte sensorimotrice qui s'est créée (voir Figure II-11, a), qui peut servir à la fois de site de mesure pour un contrôle fin des différentes parties de la prothèse mais aussi de retour sensoriel par l'excitation idoine (température, vibration, pression, force).

Certains projets comme la *SmartHand* (OttoBock) se proposent donc désormais de « réafférenter » les sujets en leur fournissant des retours proprioceptifs (contact, force, position) utilisant « les moyens invasifs et non-invasifs disponibles actuellement » (Cipriani, Controzzi et Carrozza 2011). Cette main, encore en phase de développement actuellement, pourrait compenser largement ses capacités discutables au niveau actionnement (3 positions seulement, quatre moteurs dont deux dédiés au pouce, un à l'index et le dernier au mouvement couplé du majeur, de l'annulaire et de l'auriculaire) par la liaison renforcée des patients et des 32 capteurs de leur prothèse.

La prochaine étape dans le contrôle intuitif des prothèses passera sans doute par leur interfaçage direct avec les signaux corticaux ; aujourd'hui beaucoup d'études portent sur ce domaine, l'examinant à différents niveaux (Taylor, H. et Schwartz 2002, Waldert, et al. 2008, Moritz, Perlmutter et Fetz 2008, Ouanezar, Eskiizmirli et Maier 2011, voir aussi Navarro, et al. 2005 pour une revue des différentes solutions), ceci grâce aux décennies de recherche sur les aires corticales et leur fonctionnement, particulièrement chez le singe (voir chapitre I) et les premières expériences sur l'humain sont pour le moins encourageantes (voir Figure II-12).

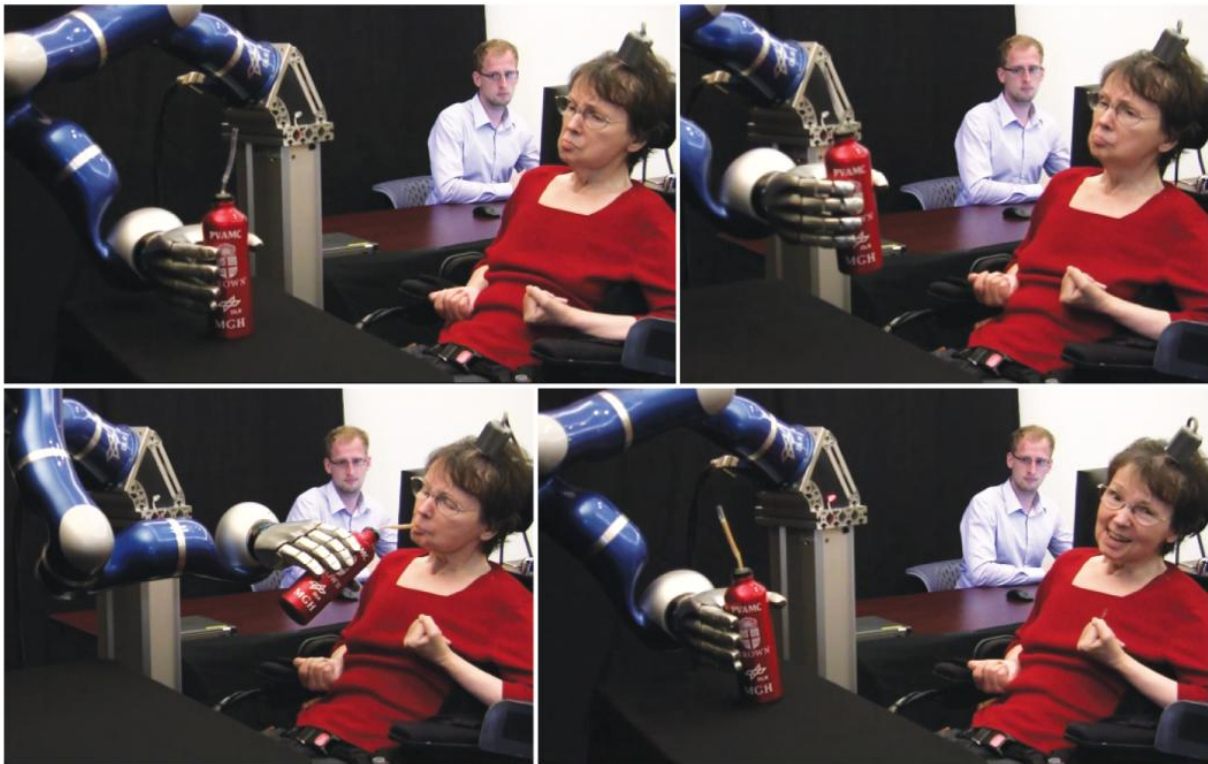


Figure II-12. Une patiente tétraplégique se sert d'un bras robotique développé par le DLR pour boire un café (Hochberg, et al. 2012). Elle le contrôle grâce à ses signaux corticaux, mesurés à l'aide d'une matrice d'électrodes implantée au niveau du cortex moteur primaire.

2. Schémas de contrôle bio-inspirés en robotique

Comme énoncé dans le chapitre I, l'humain bénéficie d'une architecture de contrôle complexe et intriquée (Modha et Singh 2010), impliquant de nombreuses structures dont le rôle est encore parfois mal connu ; il est donc difficile de reproduire son fonctionnement, même si quelques études tendent à établir un tel modèle (Iberall et Arbib 1990, Oztop, Bradley et Arbib 2004, Zollo, Eskiizmirli, et al. 2008, Eskiizmirli, Forestier, et al. 2002, Touvet, et al. 2012). Ainsi, au long des trente années qui ont vu se monter les projets que nous venons d'exposer, les acteurs du domaine ont cherché à établir des schémas de contrôle pour leurs mains en abordant le problème suivant deux axes principaux (El-Khoury, Sahbani et Bidaud 2011) :

- Les solutions **analytiques**, où les configurations de la main sont calculées en fonction de critères de prise (principalement sa stabilité) exprimés du point de vue cinématique et/ou dynamique. Elles nécessitent une modélisation complète du robot, de la tâche, des objets... et s'appuient sur l'optimisation des critères choisis. On citera notamment les travaux de Li (Li et Sastry 1988, Li, Liu et Cai 2003) et Sahbani et El-Khoury (Sahbani et El-Khoury 2009) sur la conformation en force.
- Les solutions **empiriques**, qui vont-elles s'appuyer sur l'apprentissage de données, qu'elles soient issues du comportement humain ou générées en simulation. Cette catégorie trouve forcément son inspiration dans le vivant, même dans le second cas. Les algorithmes choisis vont ainsi déterminer une solution qui satisfasse les contraintes imposées par la géométrie de l'objet et la tâche ; parfois ces solutions ne seront pas optimales du point de vue analytique, mais cependant efficaces. En outre elles présentent une grande souplesse d'adaptation face à des conditions partiellement définies ou inconnues.

Nous allons maintenant examiner plus avant le processus mis en place par le second axe.

a) Le transfert humain-robot.

A travers les deux points précédents il est possible de transférer les mouvements humains à une main artificielle. Cette approche consiste à « montrer » au robot ce qu'il doit faire et lui laisser reproduire le mouvement. Cela implique une intervention plus ou moins active de l'humain sur le robot, allant de la mise en conformation directe de la main artificielle autour de l'objet par l'opérateur (Moore, Ugur et Oztop 2010, Sauser, et al. 2012) à l'observation par le système des mouvements effectués par l'humain (Steil, et al. 2004, Romero, Kjellstrom et Kragic 2010) (Figure II-13). Il est intéressant de mettre ces recherches en perspective des neurones qualifiés de « miroirs » qui sont présents dans les structures motrices de l'homme, et qui jouent un rôle dans l'apprentissage de tâche motrice en observant faire quelqu'un d'autre (Oztop et Arbib 2002).

Ce transfert est un processus complexe, qui doit passer outre un certain nombre de points durs :

- La modélisation de la saisie effectuée par l'humain, en gérant les occultations si les entrées sont purement visuelles (détermination de la configuration de la main)
- L'adaptation de cette configuration de saisie à la cinématique du robot, ce qui implique généralement une réduction du nombre de DDL (exploration de l'espace solution)
- L'adaptation du robot aux conditions fixées par l'objet qu'il doit saisir, si elles ne sont pas strictement similaires à celles de l'opérateur.

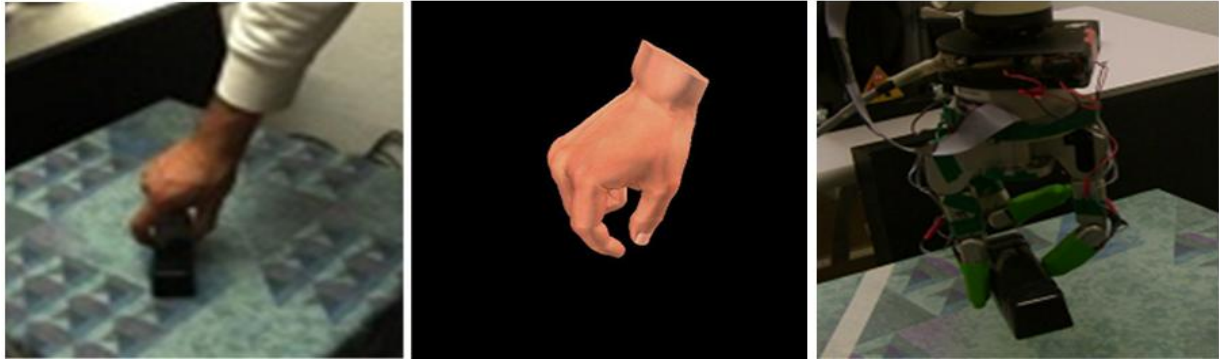


Figure II-13. Le processus de transfert Humain-Robot proposé dans (Romero, Kjellstrom et Kragic 2010). La prise est valide ; on notera les différences cinématiques entre les configurations réalisées par l'humain et le robot.

b) Détermination de la configuration de la main

Une solution empirique est basée sur l'observation du mouvement humain, il est donc nécessaire de pouvoir extraire les caractéristiques de ce mouvement, ou au moins de la position statique au moment de la saisie. Pour ce faire il est possible d'utiliser des techniques de vision classiques (Just, Rodriguez et Marcel 2006, (Menezes, et al. 2005, Romero, Kjellstrom et Kragic 2010) ou basée sur des mesures d'angles articulaires (Rezzoug et Gorce 2008) afin de classifier ensuite les postures observées. Cette étape est loin d'être triviale puisqu'elle implique de modéliser le mouvement à partir de données parfois partielles ou mal déterminées (voir chapitre V pour une analyse des contraintes liées à la reconstruction 3D à partir de données vidéo).

c) Exploration de l'espace solution.

En s'appuyant sur les travaux de taxonomies (voir chapitre I, section 3. a) il est possible d'établir un espace solution au problème de saisie, un espace qui contiendrait toutes les configurations possibles. Lorsque se présente un nouvel objet à saisir il suffit alors d'explorer cet espace afin de trouver la solution qui lui correspond (Figure II-14). Bien entendu, ce processus ne saurait être aussi simple : les études réalisant ce genre d'approche se basent sur l'optimisation de critères, que ce soit la minimisation d'un coût composite (Ciocarlie, Goldfeder et Allen 2007, Pelossof, et al. 2004), la correspondance de forme entre la main et l'objet (Li, Fu et Pollard 2007) ou encore le niveau de confort de la posture (Goussous, Marler et Abdel-Malek 2009). Il est donc impératif que ces critères soient bien déterminés afin d'éviter de choisir une solution inadéquate, que ce soit de par son infaisabilité ou sa mauvaise adaptation au contexte.

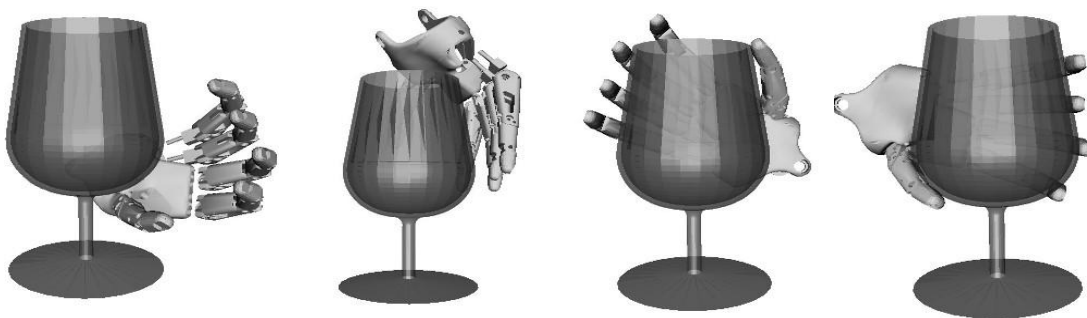


Figure II-14. Illustration du processus de recherche de solution optimale. Au cours de l'exploration de l'espace solution la main va tenter d'approcher l'objet suivant plusieurs axes, jusqu'à trouver celui satisfaisant les critères imposés. Adapté de (Ciocarlie, Goldfeder et Allen 2007)

III. Schéma de contrôle biomimétique tiré de la littérature comportementale

Cette partie présente un schéma de contrôle destiné à commander un système robotique, dans lequel nous avons implémenté des lois heuristiques présentes dans le mouvement d'atteinte et de saisie chez l'homme.

1. Résumé

Comment résoudre le double problème « Atteinte-Saisie » lié à un robot industriel (6 degrés de liberté, ddl) sur lequel a été monté une main mécanique à quatre doigts (avec 4ddl par doigt soit 16ddl)?

Une approche robotique classique viserait à optimiser la détermination du point d'approche de l'objet par la paume (6ddl du robot) et celle des points de contact des doigts sur l'objet (16ddl de la main), avant de calculer les angles correspondants via le modèle inverse de chaque chaîne cinématique impliquée, et ce pour chaque problème posé. A l'inverse, pour résoudre ce problème l'homme s'appuie sur une structure de contrôle multi-niveaux ainsi que son expérience, ce qui lui permet d'estimer la solution de manière très efficace, jamais reproduite jusqu'à présent par un système de contrôle classique et/ou intelligent basé sur des techniques d'automatisation, en particulier en ce qui concerne la saisie.

Nous avons donc choisi d'imiter en partie ce fonctionnement à travers l'utilisation d'une architecture d'unités d'appariement s'inspirant des structures présentes dans le Système Nerveux Central : chacune a en charge une partie du problème global, elles intègrent des informations (sensorielles et motrices) en provenance de la consigne et/ou d'autres unités à travers des échanges parfois redondants, et elles s'appuient sur un algorithme d'apprentissage supervisé.

Travail effectué :

- extension d'un principe de contrôle bio-inspiré développé précédemment par l'équipe ;
- intégration de lois heuristiques tirées de la littérature gouvernant les différentes composantes du mouvement ;
- validation sur site (8 objets testés x 2 types de saisie ; 3 positions x 3 orientations x 1 type de saisie).

Contribution :

L'étude du mouvement chez l'homme nous a permis d'obtenir une solution efficace au double problème d'atteinte et de saisie très rapidement et ce, malgré un type de contrôle « boucle ouverte » ; nous avons montré que l'aspect calculatoire des solutions utilisées classiquement dans le domaine robotique pouvait être court-circuité par l'utilisation de données déjà optimales.

2. Contexte de l'étude

a) le projet PALOMA

L'approche que nous allons présenter ici a d'abord été proposée et développée par des membres de l'équipe dans un autre projet européen nommé PALOMA (*Progressive and Adaptive Learning for Object Manipulation*, 2002-2006, FP6) (Zollo, Guglielmelli, et al. 2005, Eskiizmirli, Maier, et al. 2006, Zollo, Eskiizmirli, et al. 2008). L'objectif de ce projet était de modéliser les boucles sensorimotrices permettant l'atteinte et la saisie chez l'homme et d'appliquer ce mode de contrôle à un robot constitué d'une tête avec stéréovision, d'un bras à 8 ddl et une main sous-actionnée à 4ddl contrôlables (développé par le laboratoire ARTS, Scuola Superiore Sant'Anna) (Figure III-1).

Figure III-1. Le site expérimental du laboratoire ARTS (Zollo, Eskiizmirli, et al. 2008). Le robot se compose d'un système d'acquisition 3D par stéréovision dont les mouvements des yeux sont coordonnés, placé dans une tête dont le cou peut s'orienter suivant deux DDL, et d'un bras à 7DDL portant une main à trois doigts de 12 DDL (quatre par doigts) dont 4 contrôlables (2 pour le pouce, un par doigt long).

Les travaux menés sur ce site, fortement bio-inspirés, ont permis d'établir un schéma de contrôle original basé sur les intégrations sensorimotrices (voir Figure III-2)



L'originalité de cette approche est la prise en compte de l'aspect multimodal du traitement des informations par le SNC. Cette modélisation s'est appuyée sur le concept d' « unité d'appariement » (*Matching Units, MU* ; voir ENCADRE 3.UNITE) proposé par Burnod et al. (Burnod, et al. 1992), ces unités étant ensuite utilisées pour former une architecture distribuée imitant en partie les circuits d'intégration sensorimotrice présents chez l'homme (Figure III-2). D'abord appliqué en simulation à un robot quatre axes pour lui faire apprendre la relation entre retour tactile et proprioception, puis proprioception et vision (Carenzi, et al. 2004, voir aussi Shadmehr et Wise 2005, chap.9 pour une présentation en détail de cette dernière relation), ce principe a ensuite été étendu au système plus complexe présenté ci-dessus.

L'idée ici n'est pas de chercher à modéliser tout ou partie des structures corticales impliquées dans les boucles sensorimotrices (comme ont pu le faire Oztop, Arbib et leurs collègues par exemple dans Oztop et Arbib 2002, Oztop, Bradley et Arbib 2004) mais plutôt leurs projections réciproques, à travers l'établissement de liaisons d'interdépendance entre les unités. De plus, l'algorithme utilisé pour faire apprendre une fonction à ces unités (voir section 3. 1)c) s'appuie sur la notion de champ récepteur, qui trouve écho dans le fonctionnement des neurones vis-à-vis des stimuli perçus (voir Chap. I. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Encadré III-1. Le concept d'unité d'appariement

Les unités d'appariement sont des approximateurs de fonction, elles permettent d'établir une relation entre un vecteur d'entrées (sensorielles et/ou motrices) avec un autre de sortie (motrices) à travers une phase d'apprentissage. Leur grande force est de pouvoir traiter indifféremment un ou plusieurs types d'informations sensorielles, qu'elles soient de modalités identiques ou différentes. De par son fonctionnement, une unité peut être apparentée à une population de neurones appartenant à une aire corticale spécifique connue pour recevoir et traiter des informations d'au-moins deux modalités sensorielles différentes, comme c'est le cas par exemple de l'aire somatosensorielle primaire (S1) qui combine les informations tactiles et proprioceptives (entre autres). On pourra trouver d'autres exemples d'intégration multisensorielle dans les aires pariétales et frontales (Chapitre I).

Une fois la phase d'apprentissage accomplie, une unité d'appariement pourra prédire une des variables de son vecteur d'entrée en s'appuyant sur la ou les autres, et ainsi compensera les données bruitées, partielles ou manquantes. Un réseau d'unités permettra quant à lui de construire un modèle interne du système sensorimoteur en place (ici le bras et la main) en s'appuyant sur des retours sensoriels multimodaux, ainsi qu'une représentation interne des stimuli de l'environnement (ici les propriétés de l'objet) et les relations qui lient ces stimuli au système.

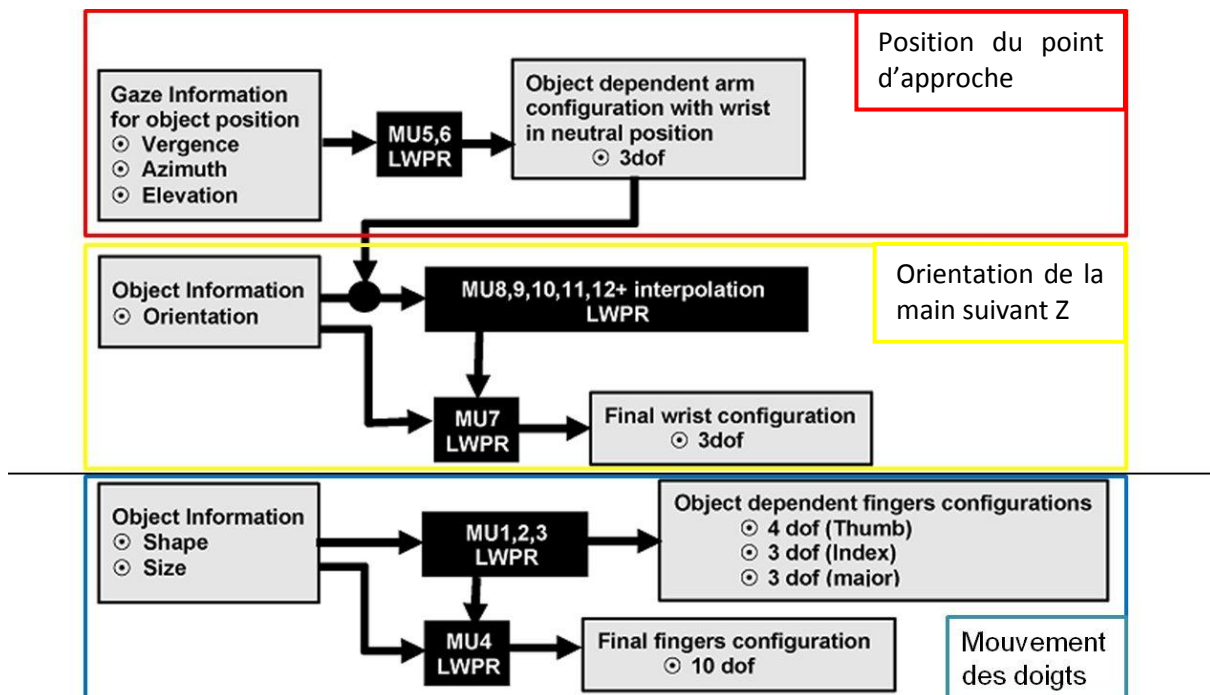


Figure III-2. L'architecture de contrôle proposée dans le projet PALOMA. Adapté de (Zollo, Eskizmirli, et al. 2008)

On distingue clairement trois sous-systèmes dans l'architecture proposée : le premier (rouge) correspond à la résolution du problème d'Atteinte à travers la détermination de la configuration angulaire du bras afin d'amener la main à proximité de l'objet ; il génère une position d'approche 3d en fonction de la position estimée de l'objet dans un repère lié au regard (extrinsèque). Il est complété par le second sous-système (jaune) qui lui va déterminer l'orientation 3d de la main en fonction de celle de l'objet et de la position d'approche. Enfin, le dernier sous-système (bleu) va résoudre le problème de Saisie en déterminant la configuration angulaire de chaque doigt et celle de la main entière.

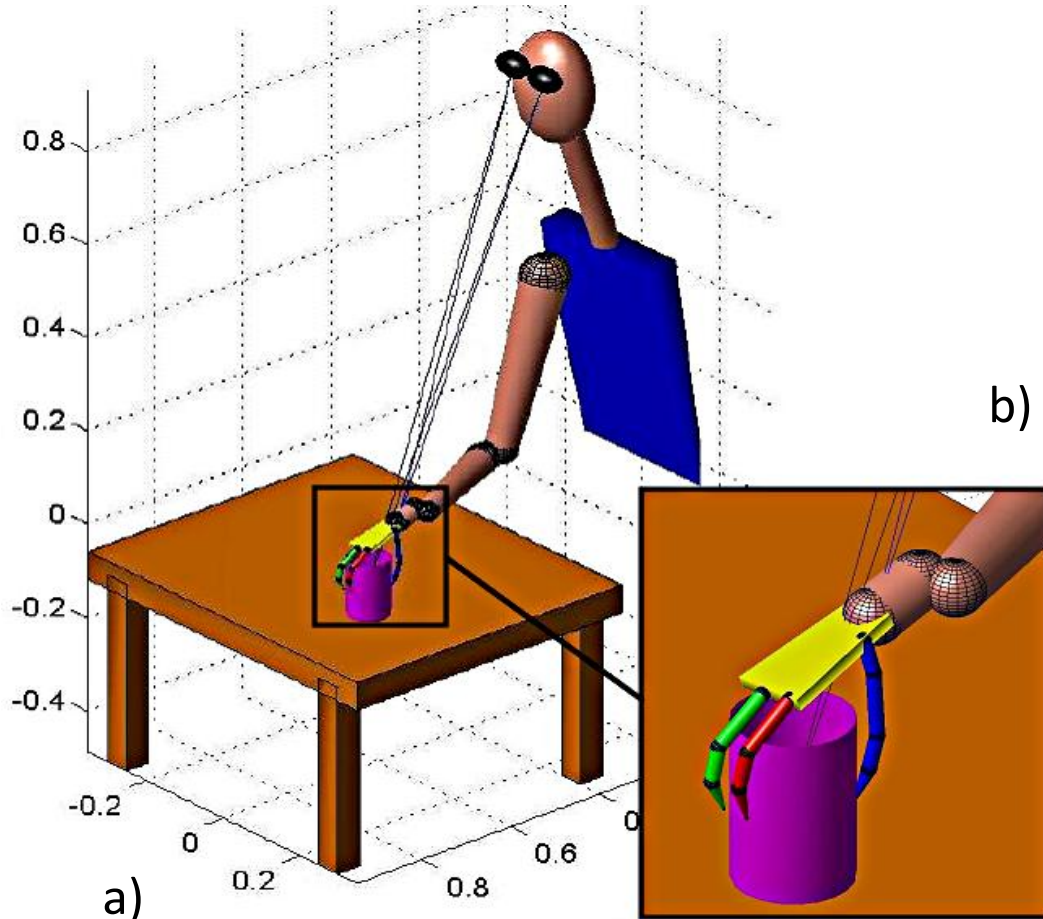
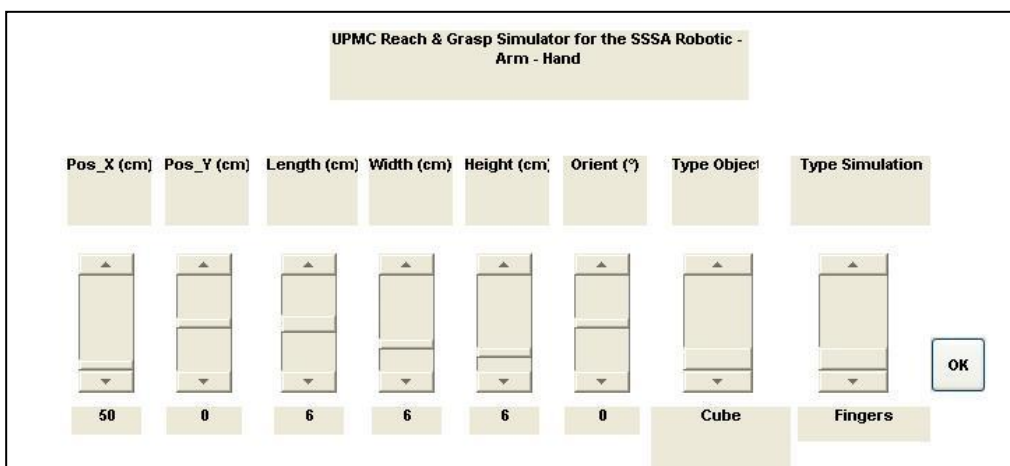


Figure III-3. Le simulateur développé le cadre du projet PALOMA (Eskizmirli et al. 2006). a) la vue globale du simulateur. b) zoom sur la configuration de prise générée par le simulateur. c) les différents paramètres ajustables.



b) le projet ABILIS

Le projet ABILIS (Approche Bio-Inspirée pour La manipulation Intelligente et la Saisie) est un projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche entre 2008 et 2011. Il regroupait un consortium de cinq laboratoires de recherche et une entreprise de transfert technologique :

- **L'institut Pprime** (P' UPR 3346, anciennement *LMS*), situé à l'Université de Poitiers ; coordinateur du projet, hôte du site expérimental et très impliqué dans la recherche sur la manipulation d'objets par des mains mécaniques et le développement de ces dernières.
- **Le Centre d'Etude de la SensoriMotricité** (CESeM CNRS UMR 8194, anciennement ANIM) hébergé par l'Université Paris V - René Descartes ; responsable de la tâche d'évaluation des modes de commande et spécialiste de l'étude des modèles de contrôle moteur inspirés de la biologie.
- **Le laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles** (LISV EA4048), dépendant de l'Université de Versailles –St Quentin ; responsable de la modélisation biomécanique et de l'étude cinématique du futur effecteur, travaillant depuis longtemps sur la bioinspiration des systèmes au niveau mécanique.
- **L'institut des Systèmes Intelligents et de Robotique** (ISIR, FRE 2507), implanté à l'Université Paris VI - Pierre et Marie Curie ; en charge de l'étude des méthodes de contrôle bioinspirées et de leur apprentissage, au faite des technique de planification de mouvement pour les systèmes complexes (dont fait partie la main).
- **Le Laboratoire de Robotique et Méso-robotique** (CEA –LIST) ; responsable du dimensionnement et de la conception de la nouvelle main, dans la droite ligne de son savoir-faire établi maintenant depuis plus de dix ans.
- **La société FATRONIK France**, responsable de la mise en œuvre et des tests réalisés sur la main de nouvelle génération, mais intervenant aussi dans son instrumentation de par sa connaissance des nouvelles technologies.

L'objectif de ce projet était double : non seulement développer un mode de contrôle hybride, issu du regroupement de techniques d'optimisation de solution de manière explicite d'une part et de commandes inspirées du vivant d'autre part, mais aussi construire une nouvelle main artificielle profitant des dernières technologies, tant du point de vue de l'actionnement que celui de l'instrumentation.

Ces deux objectifs ont été réalisés : différents modes de contrôle ont été implémentés et testés sur le site expérimental décrit dans la section (3, c), et un rapprochement a été effectué entre ces modes dans le découpage des sous-parties du problème d'atteinte et de saisie. La main mécanique a pour sa part été réalisée et devrait faire l'objet d'essais sur site dans les prochaines années.



Figure III-4. Les différents partenaires impliqués dans le projet ABILIS

3. Méthodes

a) Site expérimental du projet ABILIS

Le site expérimental du projet ABILIS, sur lequel nous avons pu mener à bien nos essais, est situé à l'institut PPrime (ancien Laboratoire de Mécanique des Solides, LMS) de Poitiers. Ce site est constitué d'un robot sériel 6 axes (Kuka KR16, voir Figure III-5) sur lequel a été embarqué une main mécanique développée par le laboratoire (Gazeau 2000).

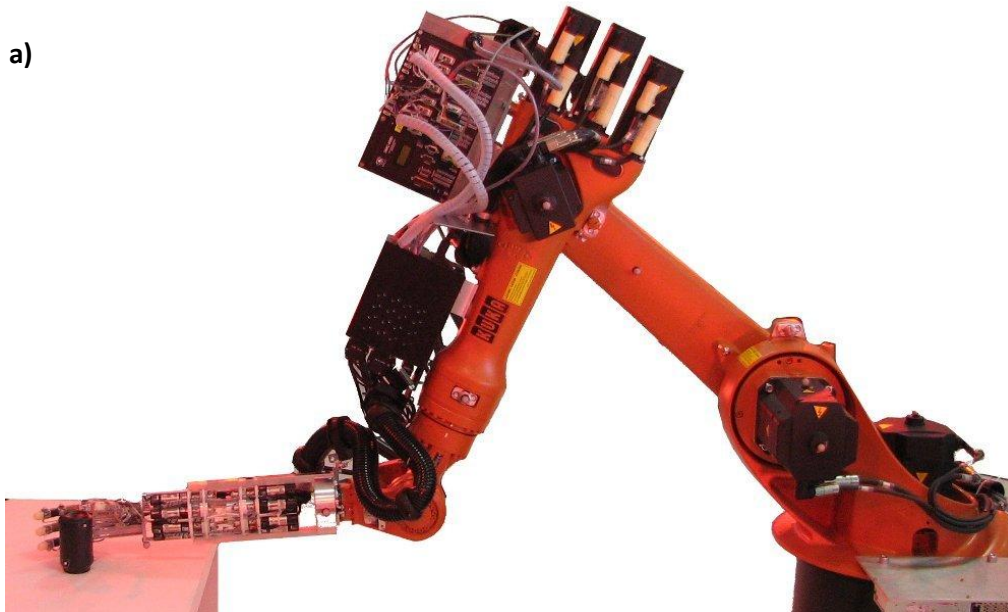
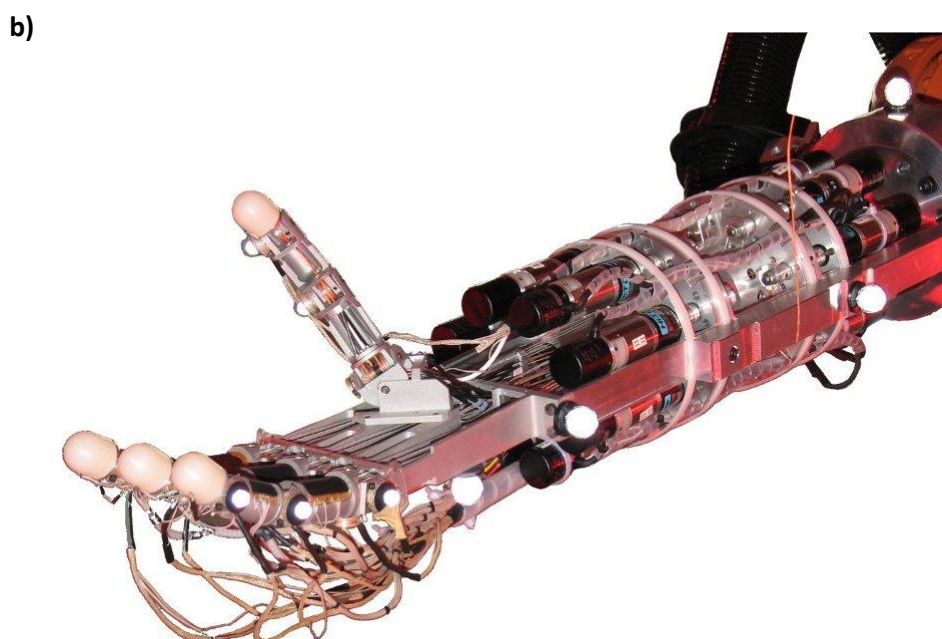


Figure III-5. Site expérimental : a) la main LMS embarquée sur un porteur KUKA KR16. b) détail de la main. On notera l'implantation des doigts, le déport des actionneurs dans l'avant bras et la transmission par câbles antagonistes, le tout visant se rapprocher au mieux de l'anatomie humaine (Gazeau 2000).



Celle-ci dispose de 20ddl dont 16 contrôlables individuellement via des moteurs à courant continu intégrés dans le support constituant l'avant-bras (voir Figure III-5, b). Chaque articulation est reliée à son effecteur via deux câbles suivant un montage antagoniste. Les quatre articulations non contrôlées sont les IPD, qui sont couplées avec les IPP (MC pour le pouce) suivant une loi tirée de la littérature (Rijkema et Girard 1991) :

Indice de couplage : $\frac{2}{3}$ pour les doigts longs, $\frac{7}{5}$ pour le pouce

Comme nous l'avons vu dans le chapitre I, pour les doigts longs ce couplage est directement lié à l'implantation des tendons ; pour ce qui est du pouce il se traduit plus par une répétabilité comportementale. D'autres couplages, résultant de l'influence du mouvement d'un axe de la chaîne cinématique sur les autres (typiquement l'abduction sur les flexions), ont été déterminés expérimentalement et sont gérés par un contrôleur flou, tandis que la non-linéarité induite par l'élongation des câbles lors de leur utilisation a été intégrée au contrôleur grâce à un réseau de neurones, ce qui va permettre de garantir une fidélité à la consigne articulaire et, via le modèle inverse, à la consigne en position (Gazeau 2000).

La main est aussi contrôlée en effort via l'estimation des efforts de serrage. Ceux-ci ne sont pas mesurés directement mais déduits de l'allongement des câbles grâce aux potentiomètres intégrés dans les articulations et aux codeurs des moteurs. De par la forte non-linéarité du comportement des câbles au cours des mouvements, une série de réseaux de neurones dédiés a été entraîné à effectuer cette estimation en soumettant chaque articulation à une gamme de contrainte totalement définie. Cette phase d'apprentissage a permis de mettre à jour les déphasages entre les positions mesurées par les codeurs situés en sortie de moteur et celles données par les potentiomètres situés en fin de chaîne cinématique, déphasage correspondant à l'allongement du câble considéré (Figure III-6) (Gazeau. 2000).

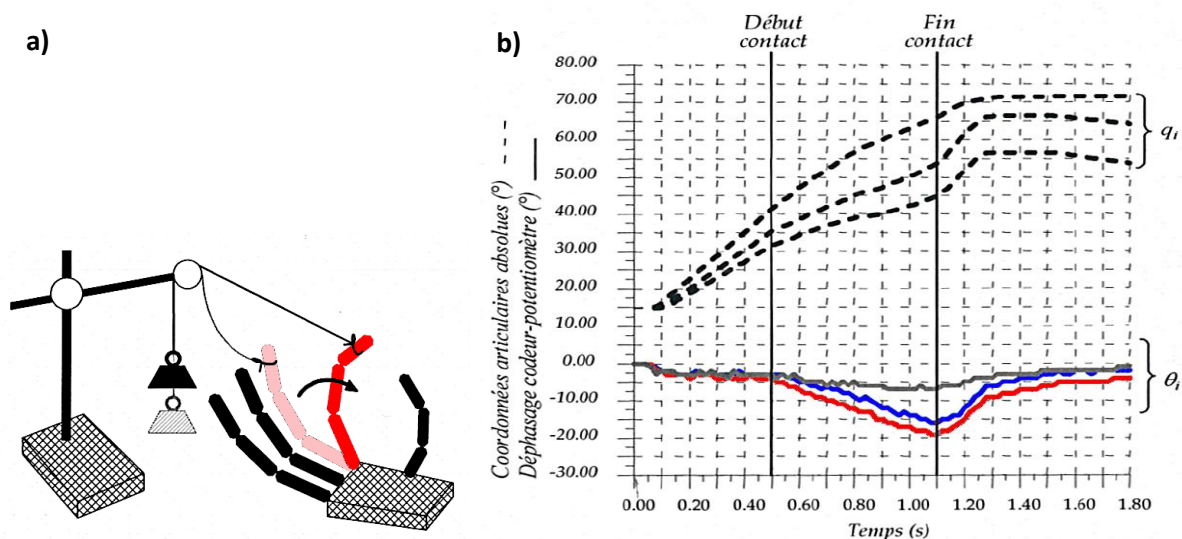


Figure III-6. Mesure de l'élongation des câbles de transmission pour permettre le contrôle en effort de la main (exemple de l'index). a) Protocole de mesure. b) Calcul du déphasage ϑ_i entre la consigne angulaire q_i générée par les moteurs et la position angulaire relevée par les potentiomètres embarqués. Adapté de (Gazeau. 2000).

b) Simulateur du site

i) Le robot porteur

Afin de résoudre les problèmes cinématiques direct et inverse du robot porteur nous nous sommes appuyés sur la boîte à outils développée par Francesco Chinello et ses collègues, au laboratoire Siena Robotics and Systems (SIRS) (Chinello, et al. 2011). Leur « KUKA Control Toolbox » (KCT) reprend en effet les algorithmes utilisés par le constructeur KUKA pour contrôler ses robots et vient faire l'interface avec l'environnement Matlab. Il devient donc possible de simuler avec précision le comportement tant statique (consigne avec points d'arrêt) que dynamique (gestion de trajectoires) de la plupart des robots industriels sériels de ce constructeur, en s'appuyant sur les données fournies par les fiches techniques.

Lors de notre utilisation de cette boîte à outils nous avons mis à jour plusieurs erreurs dans les modèles géométriques directs et inverses fournis par les auteurs, erreurs localisées au niveau du coude formé par l'axe 3 (voir Figure III-7).

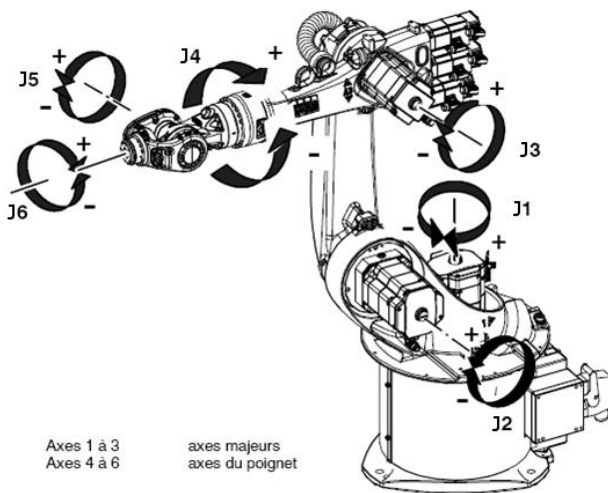
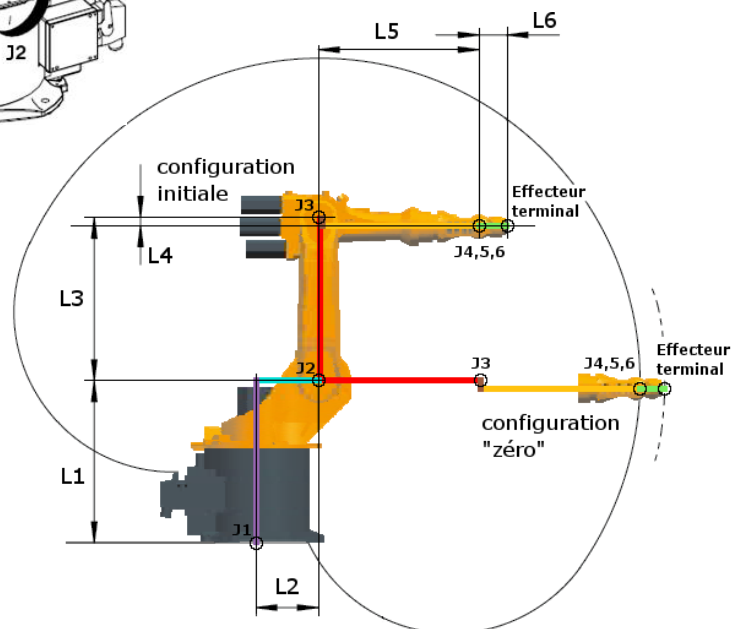


Figure III-7. La répartition des 6 axes du robot porteur Kuka KR16 (KUKA).

Figure III-8. Les distances inter-axes du robot porteur Kuka KR 16. Adapté de (KUKA).



Dimensions inter-axes (mm)						
	L1	L2	L3	L4	L5	L6
KR 16	675	260	680	35	670	158

Dans un premier temps, la distance entre le coude et le poignet -soit entre les axes 3 et 5, les axes 4, 5 et 6 étant concourants- était calculée par une seule transformation homogène prenant comme élément de translation sur X la norme de la somme des distances L4 et L5, et non par une composition de transformations homogènes utilisant les distances L4 et L5 sur deux axes orthogonaux. Cette modification a impacté les deux modèles cinématiques (voir Encadré III-2, Correction 1 ; aussi Figure III-9) et s'est traduite par la suppression d'un décalage « fantôme » entre la position théorique que générerait la consigne articulaire et le résultat obtenu.

Encadré III-2. Pseudo-code du modèle géométrique direct de la Kuka Control Toolbox

(les différentes transformations ne correspondent pas forcément à un axe motorisé)

Eléments d'entrée : $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]$

$$T_{0,1} = Rot_z(\theta_1) * Tr(0,0,L_1)$$

$$T_{1,2} = Rot_x(90^\circ) * Tr(L_2,0,0)$$

$$T_{2,3} = Rot_z(\theta_2) * Tr(L_3,0,0)$$

$$T_{3,4} \text{ original} = Rot_z(\theta_3) * Tr(\sqrt{L_5^2 + L_4^2},0,0) * Rot_y(90^\circ)$$

$$\rightarrow \text{devenu } T_{3,4} \text{ corrigé} = Rot_z(\theta_3) * Tr(L_5, L_4, 0) * Rot_y(90^\circ)$$

(Correction 1)

$$T_{4,5} = Rot_z(\theta_4) * Rot_y(-90^\circ)$$

$$T_{5,6} = Rot_z(\theta_5) * Rot_y(90^\circ)$$

$$T_{6,end_eff} = Rot_z(\theta_6) * Tr(0,0,L_6) * Rot_y(-90^\circ)$$

Avec pour résolution finale

$$T_{0,end_eff} = T_{0,1} * T_{1,2} * T_{2,3} * T_{3,4} * T_{4,5} * T_{5,6} * T_{6,end_eff}$$

Encadré III-3. Pseudo-code du modèle géométrique inverse de la Kuka Control Toolbox

Eléments d'entrée : $M_{vet_end_eff} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{end_eff / World}$ et $M_{rot_end_eff} = \begin{bmatrix} l_{x,x} & l_{y,x} & l_{z,x} \\ l_{x,y} & l_{y,y} & l_{z,y} \\ l_{x,z} & l_{y,z} & l_{z,z} \end{bmatrix}_{end_eff / World}$

- Détermination de la configuration du robot (tour d'axes)

$$\Delta = 1, \Gamma = 1$$

$$\text{si } M_{vet_end_eff}[X] < 0$$

$$\Delta = 0$$

$$\text{si } M_{vet_end_eff}[Y] < 0$$

$$\Gamma = 0$$

- Détermination des coordonnées du poignet en fonction de la position de l'effecteur terminal :

$$M_{vet_wrist} = M_{vet_end_eff} - L_6 * M_{rot_end_eff} \begin{bmatrix} l_{z,x} \\ l_{z,y} \\ l_{z,z} \end{bmatrix}$$

- Détermination de la valeur de consigne des trois premiers axes

$$t_{1_1} = a \sin \left(\frac{M_{vet_wrist}[Y]}{\sqrt{M_{vet_wrist}[X]^2 + M_{vet_wrist}[Y]^2}} \right)$$

$$\theta_1 = [(1-\Delta) * (180^\circ - t_{1_1}) + t_{1_1} * \Delta] * \Gamma + [(1-\Delta) * (-180^\circ - t_{1_1}) + t_{1_1} * \Delta] * (1-\Gamma)$$

$$t_{2_1} = a \tan \left(\frac{M_{vet_wrist}[Z] - L_1}{\sqrt{M_{vet_wrist}[X]^2 + M_{vet_wrist}[Y]^2} - \sqrt{(L_2 * \sin(t_{1_1}))^2 + (L_2 * \cos(t_{1_1}))^2}} \right)$$

$$d_{2_5} = \sqrt{(M_{vet_wrist}[Z] - L_1)^2 + \left[\sqrt{M_{vet_wrist}[X]^2 + M_{vet_wrist}[Y]^2} - \sqrt{(L_2 * \sin(t_{1_1}))^2 + (L_2 * \cos(t_{1_1}))^2} \right]^2}$$

Pseudo-code du modèle géométrique inverse de la Kuka Control Toolbox (suite)

$$t_{2_2_original} = a \cos\left(-\frac{(L_4^2 + L_5^2) - L_3^2 - d_{2_5}^2}{2 * L_3 * d_{2_5}}\right)$$

→ Introduction de deux variables temporaires

$$Angle_{L_4,L_5} = a \tan\left(\frac{\|L_4\|}{L_5}\right) \text{ et } L_{45} = \sqrt{L_4^2 + L_5^2}, \text{ qui nous donnent}$$

$$\rightarrow t_{2_2_corrigé} = a \cos\left(-\frac{L_{45}^2 - L_3^2 - d_{2_5}^2}{2 * L_3 * d_{2_5}}\right)$$

$$t_{3_1_original} = a \cos\left(-\frac{L_3^2 - (L_4^2 + L_5^2) - d_{2_5}^2}{2 * \sqrt{L_4^2 + L_5^2} * d_{2_5}}\right)$$

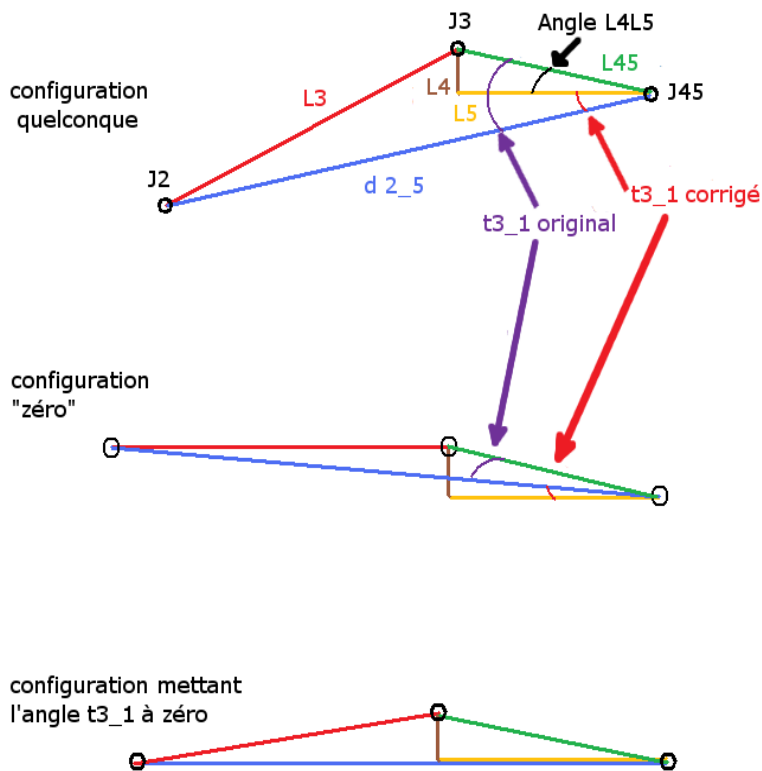
$$\rightarrow t_{3_temp} = a \cos\left(-\frac{L_3^2 - L_{45}^2 - d_{2_5}^2}{2 * L_{45} * d_{2_5}}\right), \text{ donne}$$

$$\rightarrow t_{3_1_corrigé} = t_{3_temp} - Angle_{L_4,L_5}$$

(Correction 2)

$$\theta_2 = t_{2_2} + t_{2_1}$$

$$\theta_3 = -1 * (t_{3_1} + t_{2_2})$$



La seconde correction a touché spécifiquement le modèle géométrique inverse de par la définition de l'angle formé par les liaisons L_4 et L_5 et sa prise en compte dans le modèle, ce qui n'était pas fait à l'origine et résultait en un mauvais positionnement de l'organe terminal (voir Encadré III-3, correction 2; voir aussi Figure III-9).

Suite à une correspondance avec les auteurs ces modifications ont été intégrées dans la version officielle distribuée à ce jour.

Figure III-9. Vue schématique de l'influence de la prise en compte de l'Angle L_4L_5 sur la solution globale.

Pseudo-code du modèle géométrique inverse de la Kuka Control Toolbox (fin)

- Calcul de la cinématique directe des axes 1 à 3

$$T_{0,1} = Rot_z(\theta_1) * Tr(0,0,L_1)$$

$$T_{1,2} = Rot_x(90^\circ) * Tr(L_2,0,0)$$

$$T_{2,3} = Rot_z(\theta_2) * Tr(L_3,0,0)$$

$$T_{3,4} \text{ original} = Rot_z(\theta_3) * Tr(\sqrt{L_5^2 + L_4^2},0,0) * Rot_y(90^\circ)$$

$$\rightarrow \text{devenu } T_{3,4} \text{ corrigé} = Rot_z(\theta_3) * Tr(L_5, L_4, 0) * Rot_y(90^\circ)$$

(correction 1)

$$T_{0,3} = T_{0,1} * T_{1,2} * T_{2,3} * T_{3,4} \quad \text{et} \quad M_{rot_3} = \begin{bmatrix} l_{x,x} & l_{y,x} & l_{z,x} \\ l_{x,y} & l_{y,y} & l_{z,y} \\ l_{x,z} & l_{y,z} & l_{z,z} \end{bmatrix}_{3/World}$$

- Construction de la matrice de transformation homogène entre les axes 4 et 6

$$T_{4,end_eff} = M_{rot_3}^{-1} * M_{rot_end_eff} \quad \text{et} \quad M_{rot_4} = \begin{bmatrix} l_{x,x} & l_{y,x} & l_{z,x} \\ l_{x,y} & l_{y,y} & l_{z,y} \\ l_{x,z} & l_{y,z} & l_{z,z} \end{bmatrix}_{end_eff/4}$$

- Détermination de la valeur de consigne des trois derniers axes

- Si $M_{rot_end_eff} [l_{z,z}] < 0$ et $M_{rot_end_eff} [l_{y,x}] \geq 0$ et $M_{rot_end_eff} [l_{y,z}] \geq 0$

$$\theta_4 = -a \tan\left(\frac{M_{rot_4} [l_{z,x}]}{M_{rot_4} [l_{z,y}]}\right), \quad \theta_5 = a \sin\left(\frac{M_{rot_4} [l_{z,y}]}{\cos(\theta_4)}\right), \quad \theta_6 = -a \sin\left(\frac{M_{rot_4} [l_{y,z}]}{\sin(\theta_5)}\right)$$

- Sinon, si $[M_{rot_end_eff} [l_{z,z}] < 0$ et $M_{rot_end_eff} [l_{y,x}] < 0$
ou $[M_{rot_end_eff} [l_{z,z}] < 0$ et $M_{rot_end_eff} [l_{y,z}] \geq 0]$

$$\theta_4 = -a \tan 2\left(\frac{M_{rot_4} [l_{z,x}]}{M_{rot_4} [l_{z,y}]}\right), \quad \theta_5 = a \sin\left(\frac{M_{rot_4} [l_{z,y}]}{\cos(\theta_4)}\right), \quad \theta_6 = -a \tan 2\left(\frac{M_{rot_4} [l_{y,z}]}{M_{rot_4} [l_{x,z}]}\right)$$

- Sinon, si $M_{rot_end_eff} [l_{z,z}] > 0$

$$\theta_4 = -a \tan 2\left(\frac{M_{rot_4} [l_{z,x}]}{M_{rot_4} [l_{z,y}]}\right), \quad \theta_6 = -a \tan 2\left(\frac{M_{rot_4} [l_{y,z}]}{M_{rot_4} [l_{x,z}]}\right), \quad \theta_5 = a \tan 2\left(\frac{M_{rot_4} [l_{x,z}]}{\cos(\theta_6)}\right)$$

ii) **La main mécanique**

Le modèle géométrique de la main a été intégré au simulateur développé pour ce projet en restant fidèle aux données fournies par l'institut PPrime (voir Annexe 2). Si l'équipe de l'institut considère à la fois un repère attaché à la main (R_m , situé à l'extrémité de la liaison entre la main et son support, voir Figure III-10. a) et un autre à la paume (R_p), dans notre cas nous n'avons utilisé que le second afin de permettre une correspondance plus directe avec la main biologique (Figure III-10.b), à ceci près que nous l'avons placé au centre de la liaison et non à la surface de la paume. C'est ce référentiel que la position d'approche donnée par notre architecture de contrôle place dans l'espace de travail du robot, et c'est aussi par rapport à lui que sont exprimés les points de contact des doigts sur l'objet et la position de celui-ci.

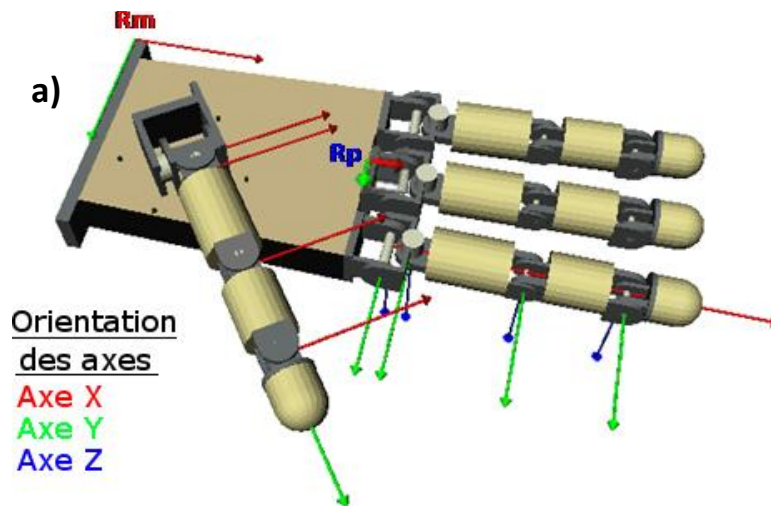
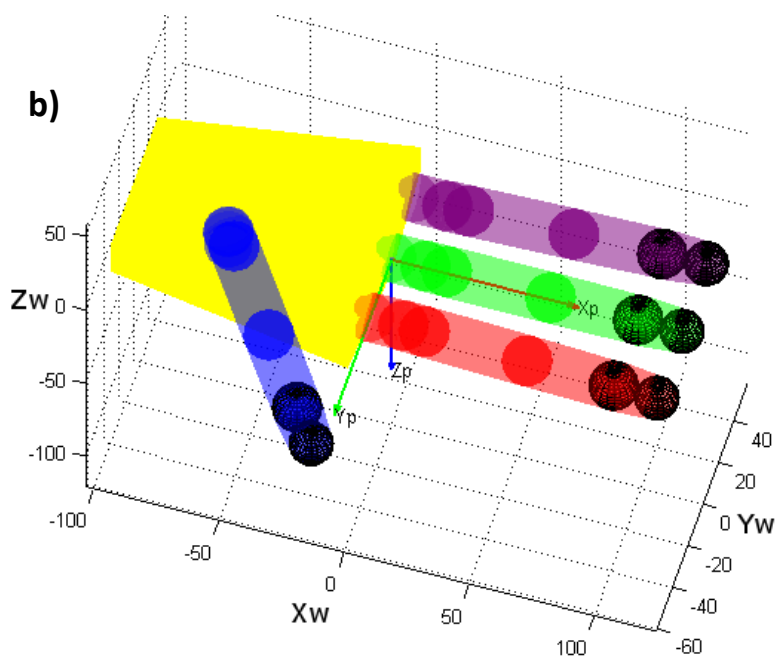


Figure III-10. La main en configuration « zéro » ($q_{ij} = 0$). a) modélisation SMAR (PPrime). b) modélisation Matlab (CESeM). R_m = Référentiel attaché à la Main, R_p = Référentiel attaché à la Paume.



Approche bioinspirée pour le contrôle des mains mécaniques

F. Touvet

La main LMS est présentée comme reprenant « taille moyenne d'une main humaine » (Gazeau 2000). Cependant si l'on considère les données anatomiques recueillies par Snyder *et al.* dans (Snyder 1977) nous pouvons établir que le rapport entre la longueur de la main mécanique (227,3mm) et celle d'une main humaine standard telle que celle présentée dans le chapitre IV (184mm) est de 1,235. Le détail de ce rapport en fonction de chaque doigt est présenté dans le Tableau III-1, et il doit être pris en considération lors d'un transfert entre l'humain et le robot.

Tableau III-1. Les dimensions de la main du LMS comparées à celles de la main humaine (Snyder 1977)

Segment	Pouce			Index			Majeur			Annulaire		
	Méc.	Hum.	Diff.	Méc.	Hum.	Diff.	Méc.	Hum.	Diff.	Méc.	Hum.	Diff.
MCP1-MCP2 / TM1-TM2	7,0	0,0	-7,0	8,5	0,0	-8,5	8,5	0,0	-8,5	8,5	0,0	-8,5
MCP2-IPP / TM2- MP	43,0	43,9	0,9	41,5	41,7	0,2	41,5	47,1	5,6	41,5	43,8	2,3
IPP-IPD / MP-IPD	35,0	31,8	-3,2	35,0	24,2	10,8	35,0	29,2	-5,8	35,0	27,8	-7,2
IPD - Centre Effecteur	17,5	27,3	9,8	17,5	21,2	3,7	17,5	22,4	4,9	17,5	21,8	4,3
Centre Effecteur - Contact	8,5	8,5	0,0	8,5	7,5	-1,0	8,5	7,5	-1,0	8,5	7,5	-1,0
Longueur totale	111,0	111,4	0,4	111,0	94,6	16,4	111,0	106,1	-4,9	111,0	100,9	10,1
Rapport	0,996			1,173			1,046			1,100		

Tableau III-2. Les butées articulaires de la main du LMS comparées à celles de la main humaine (Kapandji 2007, Savescu 2006)

	Variables articulaires	Butées	Butées	Equivalence humaine	Butées	Butées
		intérieures (°)	extérieures (°)		intérieures (°)	extérieures (°)
Pouce	q ₀₄	0	70	TM FLEX	-50	70
	q ₁₄	-15	60	TM ABD	-40	60
	q ₂₄	-90	0	MP FLEX	-60	70
	q ₃₄	-90	0	IPD FLEX	-80	10
Doigt long	q _{0j}	0	90	MCP FLEX	-30	90
	q _{1j}	-15	15	MCP ABD	-15	15
	q _{2j}	0	90	IPP FLEX	0	135
	q _{3j}	0	90	IPD FLEX	0	90

De plus, on remarquera que contrairement à la main humaine (Tableau III-2):

- les deux ddl des articulations MCP sont clairement distinctes et non concourantes ;
- les flexions/extensions MCP n'ont pas à proprement parler de possibilité d'extension ;
- les doigts longs présentent un écartement naturel de 2° par rapport à l'axe central de la main, à savoir : le majeur est dans l'axe, et l'index et l'annulaire s'en écartent de 2° dans leur direction respective.

Enfin, le point d'attache du pouce est situé très loin à l'intérieur de la paume, quasiment sur l'axe médian de la main, et au-dessus du plan de paume de plus d'un centimètre.

La structure mécanique étant désormais modélisée, nous pouvons nous consacrer à son contrôle.

c) Une architecture de contrôle distribuée pour commander le système

Afin de générer une solution au double problème Atteinte-Saisie nous avons développé une architecture distribuée d'unités d'appariement basées sur l'algorithme LWPR (voir section suivante). Avant de détailler la répartition des unités nous allons exposer dans cette section les principes de l'algorithme de régression linéaire sur lequel elles s'appuient.

i) Principes de l'algorithme LWPR

Toutes les unités d'appariement utilisées dans ce projet s'appuient sur une base algorithmique identique ; ainsi, seules les informations qui leur sont fournies lors de la phase d'apprentissage ont permis leur spécialisation vers l'une ou l'autre sous-partie du problème global à résoudre.

Le cœur de ces unités est un algorithme de *Machine learning* nommé *Locally Weighted Projection Regression* (LWPR) (Vijayakumar et Schaal 2000), qui permet d'apprendre l'approximation non-linéaire d'une fonction pouvant intégrer un nombre de dimensions élevé, et ce malgré la présence de données d'entrées erronées ou superflues. Cet algorithme détaille la fonction à apprendre en plusieurs sous-fonctions de dimensions moindres représentant une partie de l'espace d'entrée, à laquelle est assigné un champ récepteur ou *receptive fields* (RFs). Sur ces sous-espaces vont être appliquées des régressions s'appuyant sur des données locales ; les directions de ces projections vont être sélectionnées de manière à maximiser l'expression des sorties par les entrées.

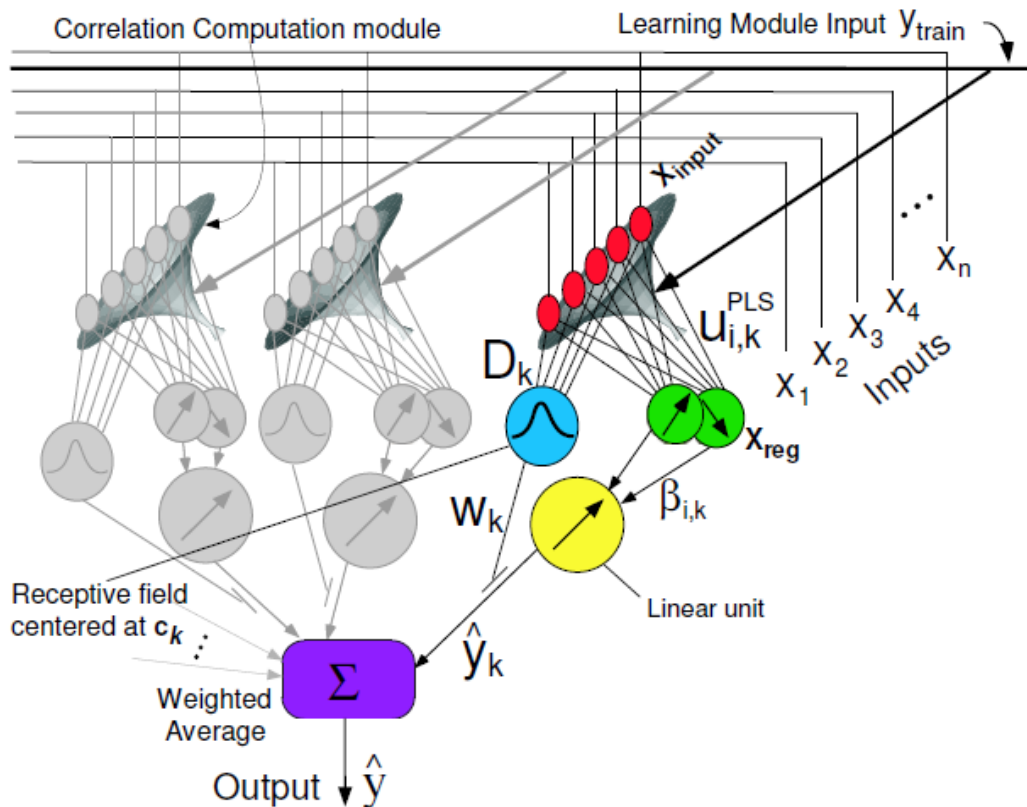


Figure III-11. Principe de fonctionnement de l'algorithme LWPR (Vijayakumar et Schaal 2000). Chaque vecteur d'entrée $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ est projeté dans K champs récepteurs répartis dans l'espace des entrées, chacun de ceux-ci centré sur une position différente c_k et possédant une métrique D_k ainsi qu'un jeu de paramètres β_k qui leur sont propres. Une estimation \hat{y}_k de la sortie attendue y_{train} est alors générée par chaque champ, et leur somme pondérée par w_k donne la solution globale \hat{y} au problème posé.

Grâce à ce mode de fonctionnement l'algorithme LWPR n'a virtuellement pas de limite au nombre de dimensions qu'il peut traiter, sa complexité calculatoire étant linéairement proportionnelle au nombre de dimensions d'entrée de la fonction à apprendre, ce qui le place en très bonne position face à d'autres algorithmes similaires (Schaal, Atkeson et Vijayakumar 2002) ; de plus, l'ajustement à la volée du nombre de RFs ainsi que leurs poids respectifs dans la solution globale assure une convergence rapide vers celle-ci.

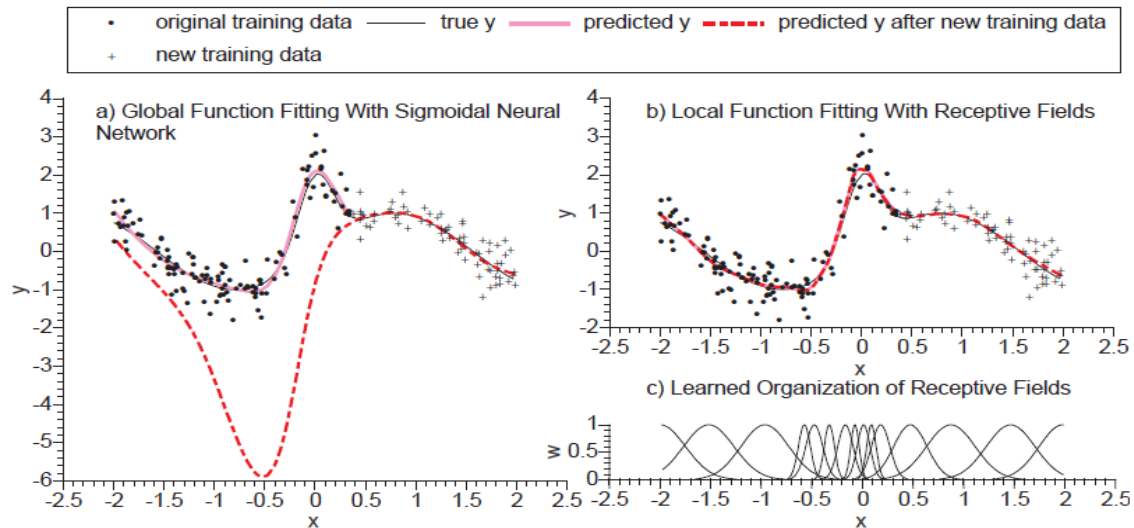


Figure III-12. Approximation d'une fonction via deux sessions d'apprentissage : a) par un réseau de neurone à fonction sigmoïde. b) par un algorithme basé sur les RFs (similaire au LWPR). c) Répartition des RFs après apprentissage final. On notera la correspondance directe entre la variation du profil de la fonction et le nombre de RFs concentrés dans un espace réduit. Tiré de (Schaal, Vijayakumar et Atkeson 1998).

Le comportement des RFs dans le fonctionnement de cet algorithme n'est pas sans rappeler celui de groupes de neurones présents dans les aires sensorimotrices du cortex ; comme eux, les RFs sont « réglés » pour réagir à un stimulus particulier dans un espace réduit. On rappellera ici l'exemple des décharges neuronales reliées à une direction de prédilection dans le mouvement de la main établies par Georgopoulos et Kalaska (Georgopoulos, et al. 1982, Crammond et Kalaska 1989) ; comme eux ils sont plastiques, leur métrique s'ajustant lors de la phase d'apprentissage pour couvrir une partie plus ou moins étendue de la fonction, allant jusqu'à la suppression ou l'ajout de nouveaux RFs quand c'est nécessaire.

Encadré III-4. Pseudo-code de la phase d'apprentissage de l'algorithme LWPR (Vijayakumar, D'souza et Schaal 2005)

- Initialisation : nombre de champs récepteurs nul ($K = 0$)
- Pour chaque exemple de la base d'apprentissage (x, y) :
 - Pour $k=1$ à K
 - Calcul du niveau d'activation w_k du RF (Équation III-3)
 - Calcul de la prédiction \hat{y}_k (Équation III-4) du modèle et son erreur MSE_k (Équation III-5)
 - Mise à jour des directions de projection et leur régression (Équation III-6) à (Équation III-9) ainsi que la métrique D_k du RF
 - Vérification de la nécessité d'augmenter le nombre de projections R
 - Si le niveau d'activation d'aucun RF n'a dépassé le seuil de génération w_{gen}
 - Création d'un nouveau RF centré sur x , avec deux directions orthogonales de projection ($R = 2$) et la métrique par défaut D_{def}

ii) Rôle des champs récepteurs

Comme nous l'avons vu jusqu'à présent, la notion de champs récepteurs tient une place centrale dans l'algorithme LWPR ; nous allons donc en détailler le fonctionnement.

Si l'on considère la relation

$$(Équation III-1) \quad y = f(x) + \varepsilon$$

avec $x \in \mathbb{R}^i$ et $y \in \mathbb{R}^j$, i et j étant le nombre de dimensions respectif des entrées et des sorties de f , et avec ε un bruit aléatoire centré sur zéro.

L'estimation \hat{y} de la solution pour un point donné x sera alors la somme normalisée des réponses \hat{y}_k des K champs récepteurs pondérées par leurs poids respectifs w_k , suivant les relations suivantes:

$$(Équation III-2) \quad \hat{y} = \frac{\sum_{k=1}^K w_k \hat{y}_k}{\sum_{k=1}^K w_k}$$

$$(Équation III-3) \quad w_k = \exp\left(-\frac{1}{2}(x - c_k)^T D_k (x - c_k)\right)$$

$$(Équation III-4) \quad \hat{y}_k = \left((x - c_k)^T, 1\right)^T \beta_k$$

Les poids w_k correspondent au niveau d'activation des champs récepteurs dans la fonction globale et leur mise à jour va dépendre de la distance du point x au centre c_k de ceux-ci dans l'espace d'entrée \mathbb{R}^i , ainsi que de leur métrique D_k (dimensions et forme de la fonction gaussienne constituant chaque RF). Pour chaque champ récepteur, une réponse \hat{y}_k est estimée par un modèle paramétrique linéaire qui va dépendre d'un vecteur de coefficients de régression β_k . Le calcul de l'erreur de prédiction MSE_k va être réalisé de manière itérative sur toutes les projections r et ce pour chaque point n utilisé en entrée :

$$(Équation III-5) \quad MSE_r^{n+1} = \lambda MSE_r^n + w_k (y_k - \hat{y}_k)^2$$

On voit ici intervenir le paramètre λ , facteur « d'oubli » qui permet à l'algorithme de donner plus d'importance aux nouvelles données et ainsi de garder une certaine plasticité.

Ce modèle paramétrique est une application des Moindres Carrés Partiels (*Partial Least Square*, PLS ; voir Encadré III-5 et (Wold 1975, Frank et Friedman 1993, Schaal, Vijayakumar et Atkeson 1998, Vijayakumar et Schaal 2000) : pour chaque vecteur d'entrée il effectue une régression linéaire sur le plus petit nombre de dimensions possible (minimum 2), la direction de ces projections étant optimisée pour maximiser la représentativité des sorties par les entrées, ceci via la recherche d'une corrélation maximale entre l'erreur résiduelle et les données d'entrée et l'utilisation de cette corrélation comme direction de projection à chaque étape de la régression (Vijayakumar, D'souza et Schaal 2005). Bien entendu, chaque projection se fait sur une seule dimension et celles-ci sont organisées orthogonalement, chaque nouvelle direction étant choisie de manière à être la plus efficace possible.

Encadré III-5. Pseudo-code de l'algorithme PLS (Vijayakumar, D'souza et Schaal 2005)

- Pour chaque exemple de la base d'apprentissage (x, y) :
 - Initialisation des erreurs résiduelles:

$$x_{res} = x, \quad y_{res} = y$$
 - Pour $k=1$ à K
 - Calcul de la direction de la projection u_k (Équation III-6)
 - Mise à jour des paramètres de régression β_k du modèle local en fonction de la projection s_k de x_{res} sur u_k (Équation III-7)
 - Régression des erreurs résiduelles y_{res} et x_{res} (Équation III-8 et (Équation III-9)

Soit u_k la direction de projection de l'entrée x par rapport à la sortie y , suivant l'initialisation de x_{res} et y_{res} :

(Équation III-6)
$$u_k = x_{res}^T y_{res}$$

On peut maintenant déterminer les paramètres du modèle β_k intervenant dans (EQ III.4)

(Équation III-7)
$$\beta_k = \frac{s_k^T y_{res}}{s_k^T s_k} \quad \text{avec } s_k = x_{res} u_k$$

Ce qui nous permet de calculer les erreurs de régression de l'entrée et la sortie sur la direction de projection u_k qui seront ensuite minimisées.

(Équation III-8)
$$y_{res} = y_{res} - s_k \beta_k$$

(Équation III-9)
$$x_{res} = x_{res} - s_k p_k^T \quad \text{avec } p_k = \frac{x_{res}^T s_k}{s_k^T s_k}$$

Lors de l'initialisation de la phase d'apprentissage, un certain nombre de champs sont répartis dans l'espace d'entrée en fonction des paramètres donnés par l'utilisateur. Ensuite à chaque itération le niveau d'activation des RFs est examiné ; si aucun d'entre eux n'atteint le seuil w_{gen} alors un nouveau champ récepteur est créé à cet endroit avec la métrique par défaut. Ainsi, durant la phase d'apprentissage d'une unité d'appariement le nombre de RFs qu'elle contient augmente tandis que son erreur à la consigne diminue (Figure III-13), jusqu'à ce que la convergence ait lieu et/ou que le critère d'arrêt soit rempli.

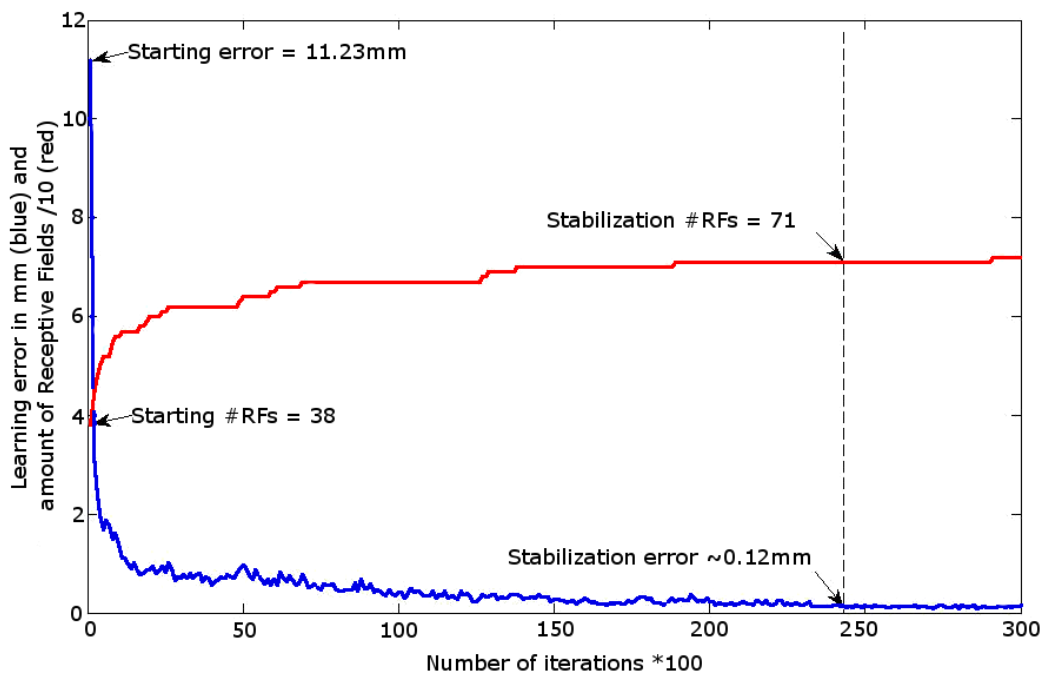


Figure III-13. Courbes typiques liées à la phase d'apprentissage d'une unité d'appariement Rouge : nombre de champs récepteurs (RFs) ; bleu : erreur quadratique moyenne entre la sortie attendue y_{train} et sa prédiction

\hat{y}_k par l'unité, dont la stabilité constitue le critère d'arrêt dans le cas présent.

De par sa robustesse, sa fiabilité et son élégance, l'algorithme LWPR nous a semblé le candidat idéal pour développer l'architecture de contrôle distribuée qui allait guider notre robot. A titre d'exemple nous pouvons nous arrêter sur le problème de la cinématique inverse des doigts, problème non-trivial à résoudre puisque redondant. La solution apportée par l'algorithme a été d'apprendre un modèle implicite de cinématique inverse à travers l'utilisation du modèle cinématique direct : chaque configuration angulaire et le point terminal lui correspondant ont été injectés dans les unités dédiées, qui ont su dessiner la relation entre ces données et ainsi nous permettre un contrôle fin des articulations des doigts sans l'utilisation d'un critère d'optimisation. Il est à noter que cet apprentissage a été mené avec et sans considération pour les couplages articulaires imposés par le site expérimental (cf section 3.a) sans que cela ne vienne affecter ses résultats.

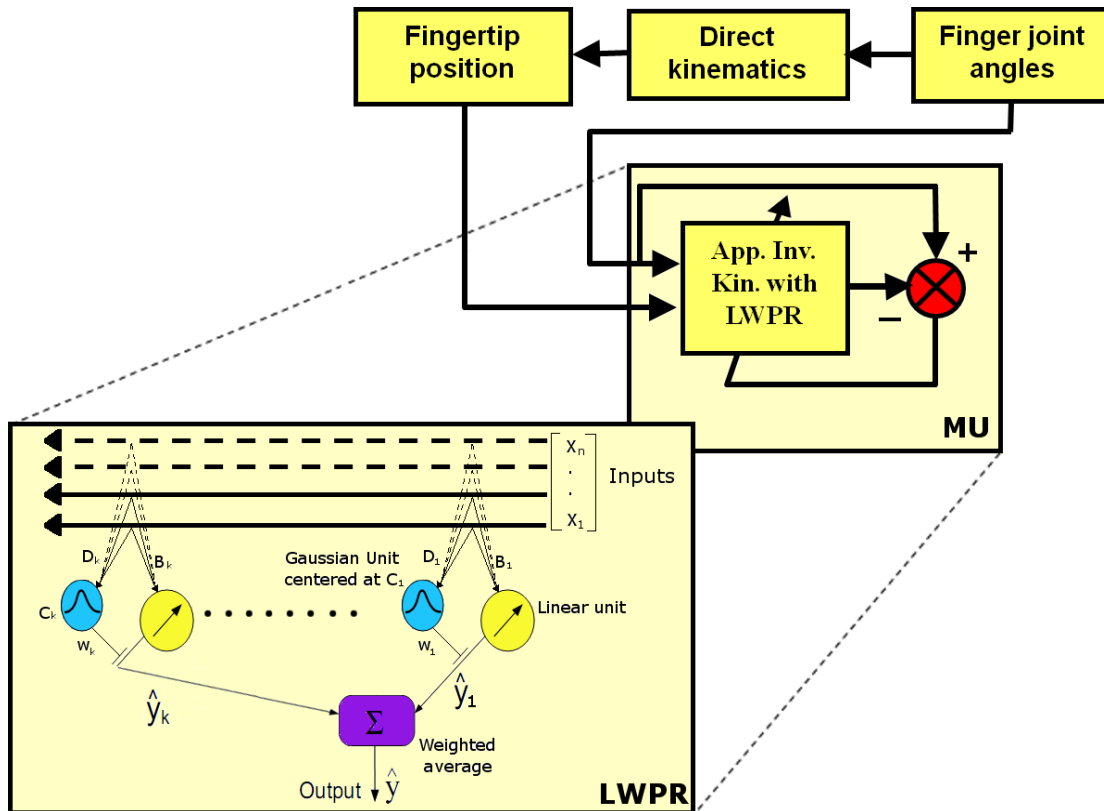


Figure III-14. Application du concept de Matching Unit au modèle cinématique inverse (Touvet, et al. 2011)..

L'utilisation d'informations locales pour former des champs récepteurs est un processus bien connu de traitement neurobiologique. L'étude de données expérimentales indique que ce type de traitement de l'information constitue un principe organisationnel de base du travail neural (Rezzoug et Gorce 2008). Considérant cela l'algorithme LWPR reproduit une propriété importante du processus d'apprentissage dans le SNC, ce qui renforce d'autant la plausibilité biologique de l'utilisation d'une architecture distribuée.

Cette architecture, présentée dans la section suivante, imite en partie les circuits visuo-moteurs du SNC, qui impliquent l'aire intrapariétale antérieure (*Anterior Intraparietal area, AIP*), le cortex primaire (M1), et les voies dorsale et ventrale du cortex prémoteur (d, vPMC) (Begliomini, Wall, et al. 2007), Fagg et Arbib 1998). Ce réseau constitue les circuits corticaux des mouvements d'atteinte et de saisie chez l'homme.

d) Adaptation à la main LMS : nouvelle architecture

Afin de contrôler la main mise à disposition par l'institut Pprime (ancien LMS), nous nous sommes inspirés de l'architecture proposée précédemment et l'avons profondément remaniée en y intégrant de nouvelles fonctionnalités (Figure III-17), tout en prenant en considération de nouvelles données :

- les trois orientations d'approche de la main par rapport à l'objet, non plus seulement celle autour de l'axe Z, normal à la surface de la table, ce qui a donné, outre un placement plus naturel de la main, les deux types de saisie : « par le côté » et « par le dessus », ainsi qu'une interpolation fondée sur les dimensions de l'objet ;
- la possibilité de déplacer l'objet dans l'espace et non plus uniquement à la surface de la table, ce qui a permis de mener des essais en utilisant un support pour les objets ;
- la pré-conformation de la main à l'objet, intervenant pendant la phase de transport, déterminée par une ouverture maximale de la main relative à la taille de l'objet ainsi qu'une séquence de mouvement définie ;
- la détermination du nombre de doigts à impliquer dans la saisie de l'objet.

Les objets considérés sont des objets archétypiques, auxquels ne correspondent pas de tâches sous-jacentes ; il s'agit d'objets combinant des composantes prismatiques (P), c'est-à-dire des faces planes à angle droit, avec des composantes sphériques (S), c'est-à-dire présentant un rayon de courbure. Ces objets sont : des parallélépipèdes -ou prismes- réguliers (PPP), des sphères (SSS) et des cylindres, verticaux (SSP) ou horizontaux (PSS). Les trois composantes considérées correspondent aux trois dimensions de l'objet : sa longueur L et sa largeur W , variant entre 1mm et 80mm ; sa hauteur H , variant entre 1 et 160mm. Pour les cylindres et les sphères, le paramètre L correspond au rayon de la partie circulaire (voir pour les objets réels utilisés pour les tests).

Cette catégorisation peut permettre de généraliser notre système à des objets non réguliers, qui peuvent être décrits par une combinaison des objets nous servant de base (Miller, et al. 2003). De plus, ce type de décomposition est cohérent avec le fonctionnement de neurones du dPMC, qui codent des représentations internes des objets et les configurations articulaires qui leur sont associées lors du processus de saisie (Begliomini, Wall, et al. 2007, (El-Khoury et Sahbani, A new strategy combining empirical and analytical approaches for grasping unknown 3D objects 2010)

Enfin, il est à noter que dans son état actuel notre modèle ne génère que des configurations de saisie impliquant deux « doigts virtuels » (*Virtual Fingers*, VF ; voir chapitre I section 3) (Arbib, Iberall, et al. 1985, Iberall et Arbib 1990) à savoir le pouce (VF1) en opposition avec les autres doigts (VF2) (Figure III-16). VF2 peut se composer d'un à quatre doigts, en fonction de leur recrutement lors de la tâche ; le centre de VF2 sera calculé en fonction de ce recrutement comme une moyenne dans l'espace des positions de l'extrémité des doigts impliqués. La manipulation d'un objet requerrait la séparation d'un autre doigt ou groupe de doigts dans un troisième VF, ceci afin de permettre une alternance dans le contact des doigts avec l'objet et donc leur repositionnement à sa surface.

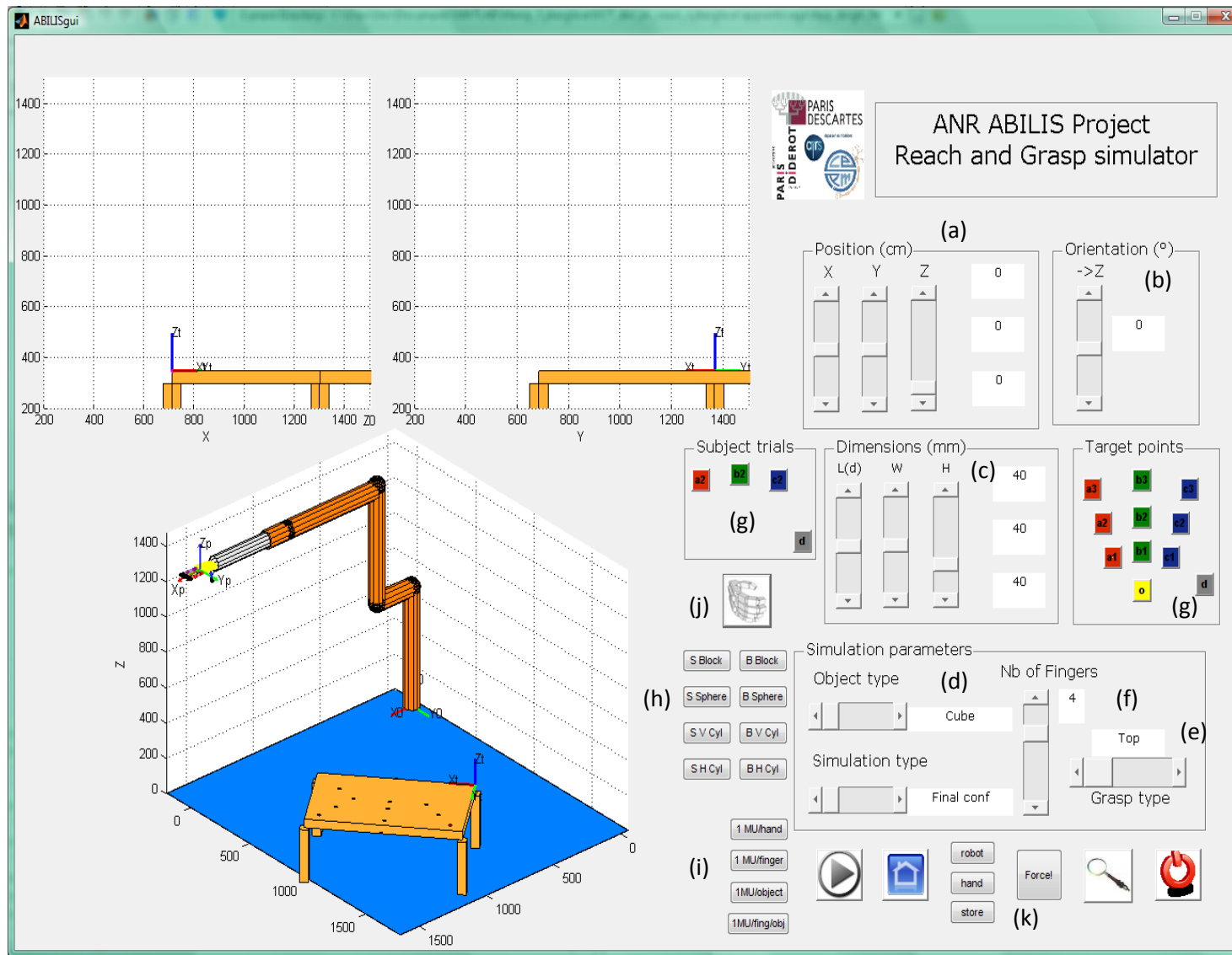


Figure III-15. L'interface du simulateur permettant de contrôler le système complet.

Les axes du robot porteur sont symbolisés par les cylindres orange, l'interface entre la main et le flasque de l'axe 6 par un cylindre gris, la paume par un polygone jaune, et chaque doigt par une série de cylindres correspondant aux phalanges avec le code couleur suivant : bleu pour le pouce, rouge pour l'index, vert pour le majeur, violet pour l'annulaire, cyan pour l'auriculaire (non représenté ici). La table porte l'objet par défaut à la position centrale. Seuls les référentiels les plus importants (World, paume, table, objet) sont représentés.

L'interface permet de faire varier la position de l'objet suivant les trois axes (a) ainsi que sa rotation autour de Z (b) et ses dimensions (c). Il est possible de choisir parmi les quatre types d'objets (d) et de paramétrer le type de saisie (e) ainsi que le nombre de doigts impliqués (f). Elle dispose en outre de presets correspondant aux points-cibles utilisés dans l'expérimentation sur le sujet sain (chapitre IV) (g) et, aux objets utilisés dans ce chapitre-ci (h), et permet de choisir parmi quatre architectures de contrôle (i), le modèle de la main LMS ou celui de la main humaine (j). Enfin il est possible d'enregistrer puis d'imposer tout ou partie de la configuration (k).

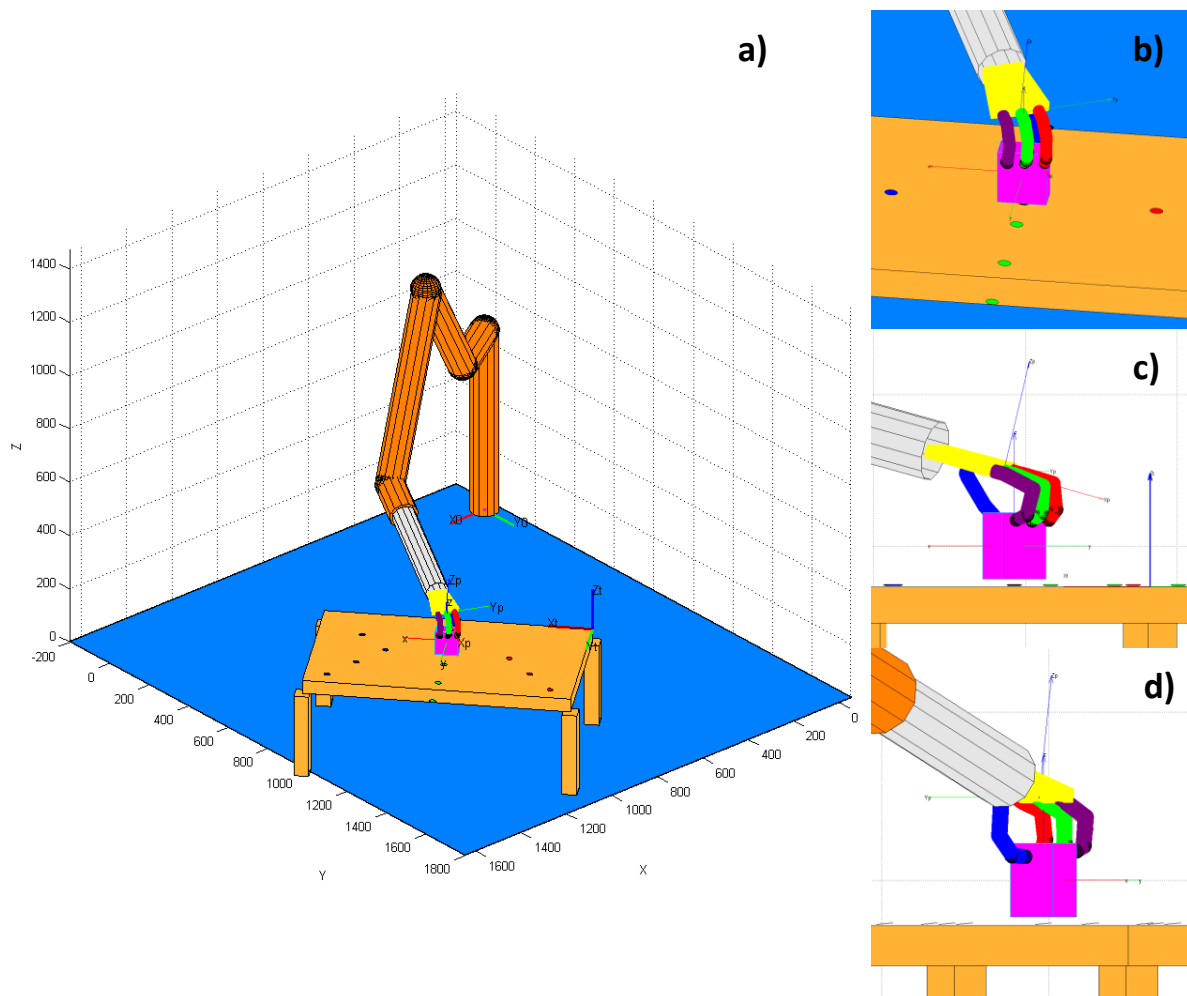


Figure III-16. Exemple de configuration de saisie par le dessus (petit parallélépipède).

Le centre de paume est placé au-dessus de l'objet, légèrement reculé et translaté horizontalement par rapport à l'axe central de celui-ci (voir chapitre I). La main est orientée suivant les trois directions, afin de faciliter le positionnement des points terminaux des doigts sur l'objet. Enfin, ces points terminaux sont répartis à la surface de l'objet afin de maximiser l'efficacité et la stabilité de la prise.

a) Vue d'ensemble de la configuration d'atteinte et de saisie

b) Zoom sur la configuration de saisie

c) et d) Détail du positionnement des doigts sur l'objet.

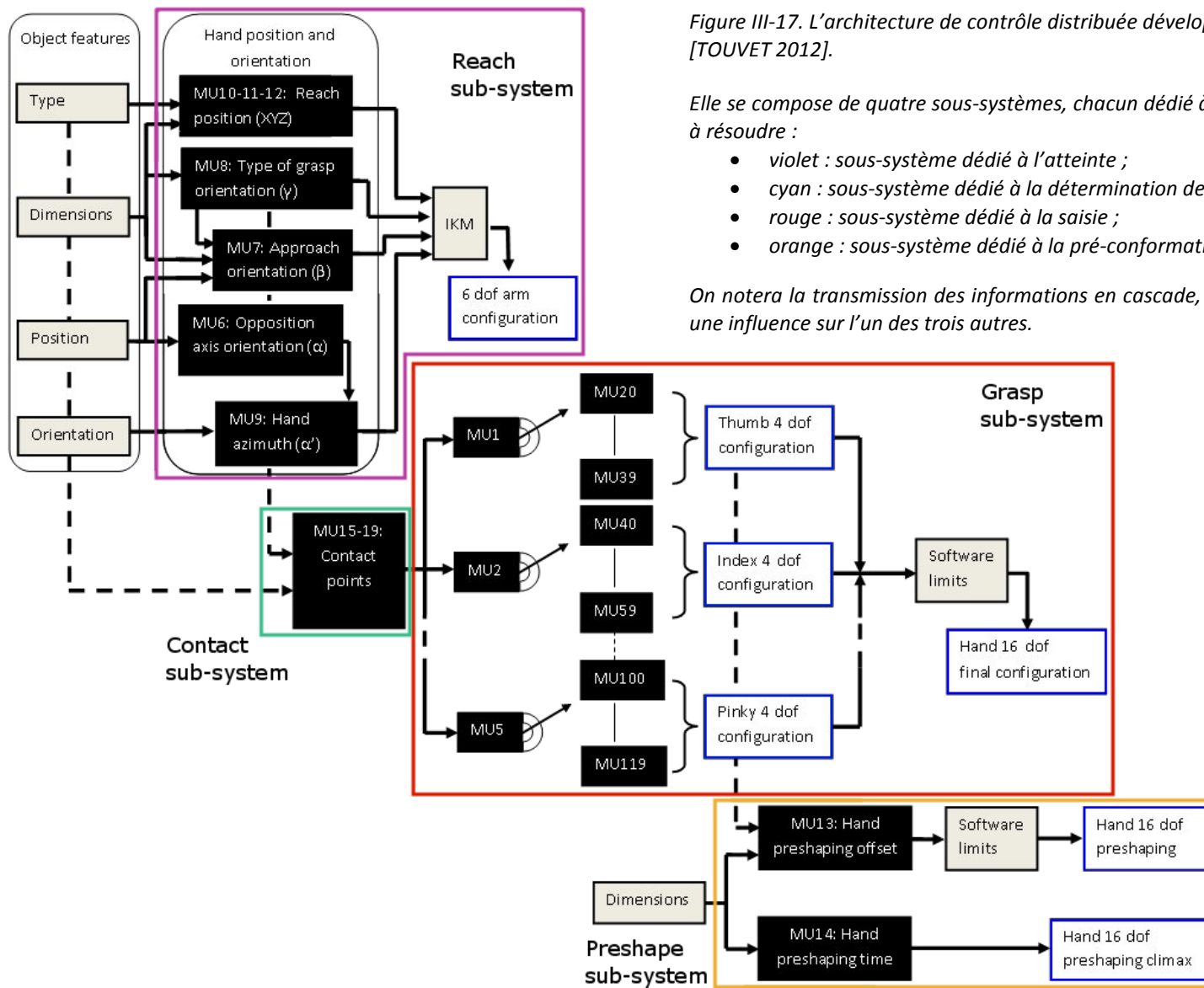


Figure III-17. L'architecture de contrôle distribuée développée dans le cadre du projet ABILIS [TOUVET 2012].

Elle se compose de quatre sous-systèmes, chacun dédié à un aspect particulier du problème à résoudre :

- violet : sous-système dédié à l'atteinte ;
- cyan : sous-système dédié à la détermination des points de contact sur l'objet ;
- rouge : sous-système dédié à la saisie ;
- orange : sous-système dédié à la pré-conformation de la main sur l'objet.

On notera la transmission des informations en cascade, chaque système ou presque ayant une influence sur l'un des trois autres.

Nous allons maintenant examiner les entrées et sorties du système, chaque sous-système qui le compose, mais aussi les unités d'appariement contenues dans les sous-systèmes et les règles utilisées pour déterminer les fonctions qu'elles ont apprises.

i) Entrées et sorties du système

Si l'on observe la Figure III-17 on peut voir que le système accepte en entrées les informations liées à l'objet, comme les fourniraient les voies visuomotrices du SNC. Ces entrées peuvent être regroupées en deux classes :

- Les caractéristiques intrinsèques de l'objet, qui lui sont propres et sont indépendantes de son environnement : ses dimensions suivant les trois axes (donc sa taille par rapport à la main), et à un niveau d'abstraction plus élevé son type qui peut être de quatre sortes :
 - parallélépipède rectangle,
 - sphère,
 - cylindre vertical
 - cylindre horizontal
- Ses propriétés extrinsèques, cette fois directement liées à sa relation à l'environnement dans lequel il se trouve : sa position dans les trois dimensions et son orientation suivant l'axe Z. Les orientations suivant les autres axes ne sont pas considérées, à part pour le cylindre horizontal.

Il est possible aussi d'ajouter à ces données une entrée liée à la tâche, à savoir le type de saisie à effectuer ; par défaut le système détermine de lui-même cette information mais l'utilisateur peut le forcer à réaliser une prise « par le dessus » ou « par le côté ».

Les sorties quant à elles sont de deux types, en fonction du sous-système examiné

- Des coordonnées cartésiennes pour le sous-système dédié à l'Atteinte ; puisque la génération de configurations angulaires du robot porteur avait déjà été effectué dans le projet PALOMA et que ce processus s'était révélé particulièrement coûteux en terme de temps d'apprentissage nous n'avons pas jugé opportun de reproduire ici cette validation. Nous nous sommes donc appuyés sur le modèle cinématique inverse du robot fourni dans la *Kuka Control Toolbox* pour calculer ces configurations à partir des données générées par notre système.
- Des coordonnées angulaires pour les sous-systèmes dédiés à la pré-conformation et à la Saisie. Cette fois les consignes angulaires finales ont été prises en charge directement par le système, par l'intermédiaire du sous-système dédié au contact des doigts sur l'objet et l'utilisation d'un modèle inverse de la main implicite (voir sections suivantes).

ii) **Sous-système dédié à l'Atteinte (Reach Sub-system)**

Il est constitué de sept MUs, les trois premières étant attribuées chacune à la position d'approche correspondant à un type d'objet en particulier (parallélépipède, sphère, cylindre quelle que soit son orientation), et les quatre autres à son orientation (Figure III-18).

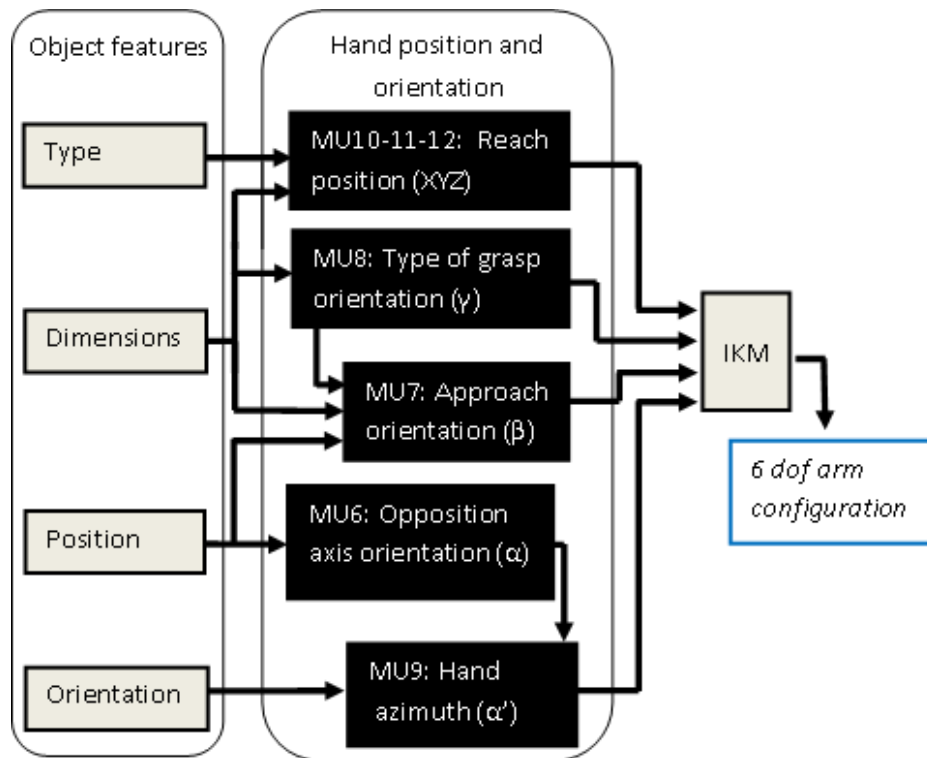


Figure III-18. Le sous-système générant la configuration d'atteinte du bras porteur à 6ddl (Touvet, et al. 2011).

Position de la main

Cette position est déterminée via le calcul d'un offset paramétrique entre le barycentre de l'objet et la position du centre de paume ; cet offset va présenter des différences en fonction de l'objet à saisir, ce qui explique cette répartition. Les MUs 10 à 12 vont donc nous servir à déterminer ce positionnement en prenant en considération les dimensions de l'objet, en particulier leur longueur L et leur hauteur H , suivant la répartition suivante : MU10 pour les prismes droits, les cylindres verticaux pris par le côté et les cylindres horizontaux pris par le dessus, considérés comme étant saisis de la même façon dans ce cas précis; MU11 pour les sphères ; enfin MU12 pour les cylindres horizontaux saisis par le côté et les cylindres verticaux saisis par le dessus.

Les règles de calcul ont été adaptées de travaux antérieurs de l'équipe de l'institut PPrime (Fernandez 2007) et sont données dans les équations (Équation III-10 à Équation III-12).

Équation III-10
$$MU10_{output} = [20,0,40]mm + \left[\frac{L}{2}, 0, \frac{H}{2} \right]$$

Équation III-11
$$MU11_{output} = [0,0,30]mm + \left[\frac{L}{4}, 0, \frac{L}{2} \right]$$

Équation III-12
$$MU12_{output} = [0,0,30]mm + \left[\frac{L}{2}, 0, \frac{L}{2} \right]$$

Ce mode de détermination du point d'atteinte participe directement au succès de la saisie, en ce qu'il place la main au meilleur endroit pour que la configuration de prise soit efficace et qu'elle limite au maximum les contraintes articulaires fortes (frontières des domaines articulaires, collisions). De plus, il évite de balayer la zone de travail par un apprentissage exhaustif de celle-ci, sachant que de toute façon nous n'utiliserions qu'une sous-partie de cet espace ; ainsi nous obtenons là une solution implicitement optimisée par rapport à l'objet et ses caractéristiques.

Orientation de la main

Les quatre autres unités sont quant à elles dédiées aux trois orientations de la main lorsqu'elle vient se placer à proximité de l'objet ; chaque unité gère une orientation, la quatrième venant compléter celle autour de Z avec la prise en compte de l'orientation de la table sur laquelle est placé l'objet. Contrairement à ce qui avait été fait dans le projet PALOMA, nous ne cherchons pas ici à générer une solution en interprétant les sorties de plusieurs MUs (Zollo, Eskiizmirliler, et al. 2008) ; pour chaque axe de rotation nous n'utilisons qu'une et une seule MU, ce qui traduit un niveau de fonctionnement plus abstrait que celui développé précédemment.

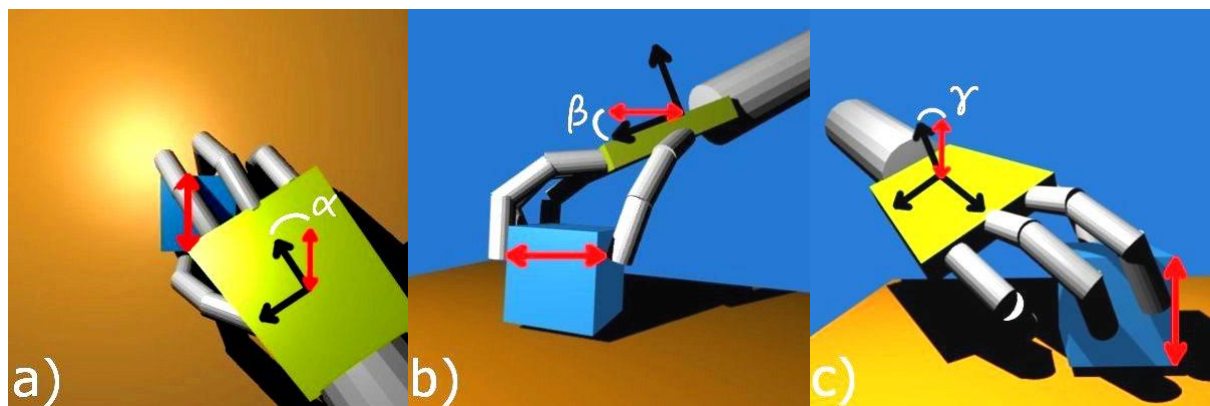


Figure III-19. Représentation des trois orientations de la main vis-à-vis de l'objet à saisir (Touvet, et al. 2011).
a) L'orientation de l'axe d'opposition α . b) L'orientation d'approche β . c) L'angle déterminant le type de saisie λ .

Nous avons commencé par nous intéresser à l'**orientation de l'axe d'opposition** (α , Figure III-19.a), qui correspond à la ligne tracée entre les extrémités des deux Virtual Fingers VF1 et VF2 (Iberall et Arbib 1990) tels que nous les avons définis précédemment. Dans leur étude (Paulignan, Frak, et al. 1997), Paulignan *et al.* proposent que cette orientation puisse être exprimée en fonction de la position de l'objet à saisir dans le plan XY par rapport au repère cyclopéen du sujet. Ils ont étudié comment des sujets sains peuvent saisir des cylindres verticaux (comme des canettes de boisson, par exemple) disposés sur une table qui leur fait face et en ont déduit que la main et l'avant-bras agissaient à l'unisson, c'est-à-dire maintenaient globalement une orientation constante par rapport aux centres de rotation du coude et de l'épaule tout au long du mouvement.

Malgré le fait que ce résultat soit ultérieurement démontré comme étant partiellement correct puisque soumis à des contraintes non prises en compte par les auteurs, comme la direction du mouvement d'atteinte ou encore le confort de la posture finale (Roby-Brami 2000), dans nos conditions d'expérimentation ces paramètres ne s'appliquent pas : il n'y a pas de notion de confort pour notre robot porteur (du moins, pas la même que celle que pourrait ressentir un agent humain) et le mouvement est invariablement généré à partir du même point de départ ; en conséquence, le calcul de cet angle donne le même résultat que l'on prenne ce dernier paramètre en compte ou non. Nous avons donc choisi de suivre le principe d'économie attribué à Guillaume d'Ockham et avons entraîné la MU6 à moduler l'angle α en fonction de la position de l'objet sur la table par rapport au repère correspondant à la position d'un humain effectuant la tâche (Équation III-13)

$$(Équation III-13) \quad MU6_{output} = aK + b, \text{ avec } K = \arctan\left(\frac{X_{obj}}{Y_{obj}}\right)$$

Le second angle d'orientation de la main constitue son **orientation d'approche** (β , Figure III-19.b), c'est-à-dire l'élévation de la paume par rapport au plan horizontal qui passe par le centre de masse de l'objet lors d'une saisie par le dessus. Des données comportementales montrent que cet angle est ajusté lorsque l'on saisit des objets de tailles différentes, à travers le ratio de ces dimensions par rapport à la taille de la main du sujet. Dans ce cas, le pouce et l'avant-bras ont tendance à se comporter comme un seul ensemble, tandis que les doigts longs agissent comme un second groupe (Cesari et Newell 1999), principalement en adaptant l'angle de flexion/extension des articulations MCP.

Nous verrons dans la discussion des résultats que cette orientation revêt une importance capitale dans la faisabilité d'une saisie. L'angle de la paume qui en résulte est compensé par des mouvements du poignet et possiblement de l'épaule. Dans notre architecture distribuée la MU7 a appris à calculer cet angle en fonction du type de saisie γ fourni par la MU8 (voir ci-dessous), de la largeur W de l'objet par rapport à une taille de main donnée et enfin, dans une moindre mesure, en fonction de la distance de l'objet par rapport au centre cyclopéen d'un possible sujet effectuant la tâche suivant l'axe Y .

$$(Équation III-14) \quad MU7_{output} = \cos(\gamma) \sum aK + b, \text{ avec } K = [W_{obj}, Y_{obj}]^T$$

Enfin, l'orientation correspondant au **type de saisie** (γ , Figure III-19.c) va principalement dépendre de l'axe principal de l'objet, c'est-à-dire dans notre cas sa plus grande dimension (celle qui permettra une saisie la plus efficace possible, jusqu'à un certain point). L'axe d'opposition α sera alors choisi normal à l'axe principal de l'objet. Nous avons entraîné la MU8 à déterminer la valeur de l'angle γ suivant ce principe, entre les valeurs extrêmes de saisie « par le dessus » et « par le côté » (Équation III-15) ; comme c'est le cas notamment lorsqu'on demande à quelqu'un de saisir une canette ou une bouteille sans qu'il y ait de précision quant à la tâche à effectuer. Cependant il est évident que cette approche est limitée et qu'elle devient caduque dès l'instant que la notion de tâche entre en jeu, ce qui est un facteur de première importance dans la génération de prises chez l'humain (Iberall et Arbib 1990). Nous avons malgré tout choisi d'implémenter cette « proto-tâche », en attendant une étude plus complète de l'influence de la tâche sur la configuration de l'atteinte et de la saisie.

$$(Équation III-15) \quad MU8_{output} \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right], \text{ en fonction du rapport } \frac{L_{obj}}{H_{obj}}$$

Il nous reste à étendre l'orientation de la main au repère de référence global en prenant en compte l'orientation de la table dans le calcul général de l'**azimut de la main** (α'), ce qui est réalisé grâce à une simple *Look-Up Table* apprise par la MU9, à partir de l'axe d'opposition α donné par la MU6, de l'orientation de l'objet sur la table et de l'orientation de la table dans la scène, le tout suivant l'axe Z_0 .

iii) Sous-système dédié aux points de contact (Contact Sub-system)

Ce sous-système est constitué de cinq *Matching Units* : les quatre premières sont dédiées à la détermination des points de contact des doigts sur l'objet en fonction de son type, tandis que la dernière régule le recrutement des doigts en fonction de la géométrie de l'objet par rapport à celle de la main.

Ce sous-système représente notre meilleur exemple des capacités de l'algorithme LWPR à travailler dans un grand nombre de dimension. En effet, non seulement les MUs dédiées à la génération des points de contact reçoivent en entrée les informations liées à l'objet (soit un vecteur de 10 entrées) mais elles intègrent aussi le résultat des MUs du sous-système lié à la saisie ; en sortie, elles fournissent les coordonnées suivant X, Y et Z du point terminal de chaque doigt (soit une matrice de 3 x 5 sorties, au plus). Par conséquent, il n'y a pas de formulation explicite des fonctions de transfert apprises par les MUs de ce sous-système ; nous pouvons cependant examiner la manière dont a été menée leur phase d'apprentissage.

Détermination des points de contact

Nous utilisons ici une approche purement géométrique : dans un premier temps nous modélisons l'objet à saisir puis nous calculons les positions des points de saisie correspondant à chaque doigt. La raison pour cette limitation à la géométrie tient au fait que le site expérimental ne disposant pas de capteur de force au niveau des points terminaux il était malaisé de l'implémenter en simulation. Nous verrons cependant dans la section 4 que ce choix n'a pas empêché d'avoir de bons résultats.

Au niveau structurel d'abord, nous avons choisi d'assigner une MU à chaque type d'objet : MU15 pour les parallélépipèdes, MU16 pour les sphères, MU17 pour les cylindres verticaux et MU18 pour les cylindres horizontaux, ces deux dernières étant choisies en fonction de l'axe de saisie déterminé par MU8.

Ensuite, nous avons soumis la détermination des points de contact des doigts sur l'objet à deux règles permettant de satisfaire le critère de *force closure* (voir chapitre I, 3, a et Figure III-20) :

- tous les points appartiennent à un même plan (Zatsiorsky et Latash 2008), qu'il soit vertical (Figure III-20.a) pour une saisie par le côté ou horizontal pour une saisie par le dessus ;
- l'ouverture des doigts impliqués dans VF2 sur l'objet (de par leur abduction/adduction) est calculée de manière à couvrir la plus grande surface possible (Figure III-20.b).

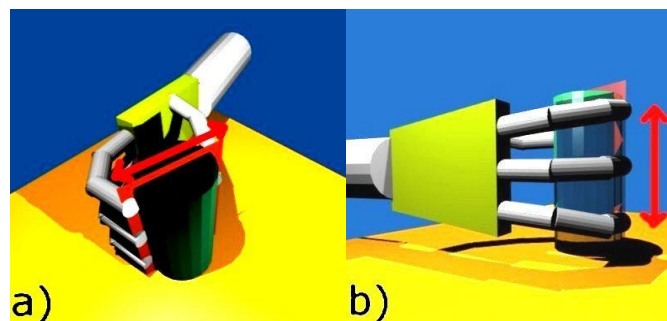


Figure III-20. Représentation graphique des deux lois régissant la détermination des points de contacts sur l'objet (Touvet, et al. 2011). a) Les points terminaux de tous les doigts appartiennent à un même plan. b) L'ouverture inter-digitale est maximisée

Enfin, la position désirée des points de contact est donnée aux MUs via le calcul d'un offset par rapport au centre de masse de l'objet, dont le principe est présenté par les équations (Équation III-17, Équation III-20, la première ligne correspondant au point de contact du pouce et la suivante ceux des doigts longs.

$$(Équation III-16) \quad dist = \frac{[dim_{obj,1} \quad dim_{obj,2} \quad dim_{obj,3}]}{2} + rad_d, \quad dim \in \mathbb{R}^3, \text{ en mm}$$

$$(Équation III-17) \quad MU15_{output} = \begin{bmatrix} -dist_2 & \frac{-AP_d(dist_1 - AP_d)}{40} & 10 - dist_3 \\ dist_2 & \frac{-AP_d(1 + (dist_1 - AP_d))}{40} & 10 - dist_3 \end{bmatrix}$$

$$(Équation III-18) \quad MU16_{output} = \begin{bmatrix} -dist_1 \cos(alpha_d) & -dist_1 \sin(alpha_d) & 0 \\ dist_1 \cos(alpha_d) & -dist_1 \sin(alpha_d) & 0 \end{bmatrix}$$

$$(Équation III-19) \quad MU17_{output} = \begin{bmatrix} -dist_1 \cos(alpha_d) & -dist_1 \sin(alpha_d) & 10 - dist_3 \\ dist_1 \cos(alpha_d) & -dist_1 \sin(alpha_d) & 10 - dist_3 \end{bmatrix}$$

$$(Équation III-20) \quad MU18_{output} = \begin{bmatrix} -dist_2 & \frac{-AP_d(dist_1 - AP_d)}{40} & 0 \\ dist_2 & \frac{-AP_d(1 + (dist_1 - AP_d))}{40} & 0 \end{bmatrix}$$

Avec :

AP_d Le point-racine (*Attachment Point*) du doigt d .

rad_d Le rayon (*radius*) du doigt d .

$alpha_d$ L'angle formé par le segment reliant le centre de paume et le centre de masse de l'objet et celui reliant le centre de paume et le point-racine du doigt d , dans le même plan que l'angle d'opposition α .

$dist$ Le vecteur des composantes de l'objet suivant les trois dimensions dim_{obj} . A noter que les dimensions $dim_{obj,1}$ et $dim_{obj,1}$ peuvent s'interchanger en fonction du type de saisie \mathbf{y} adopté.

La corrélation entre la détermination des points de contacts et les dimensions de l'objet à saisir s'exprime dans un sous-espace du domaine de travail complet des doigts (voir section suivante) comme le montre la Figure III-21; la forme et la taille de ce sous-espace va dépendre du type d'objet considéré.

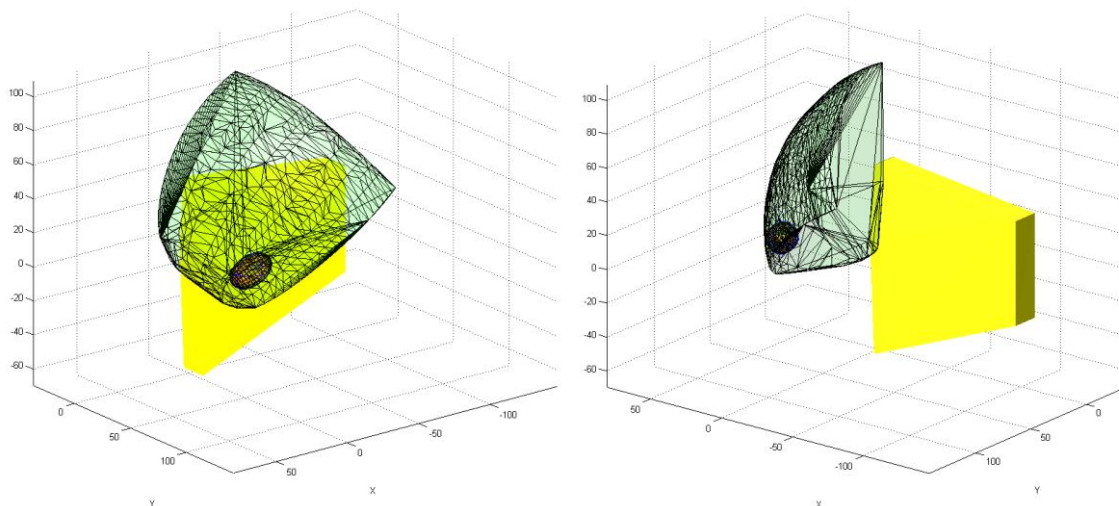


Figure III-21. Rapport entre le domaine de travail du pouce (en vert translucide) et le sous-espace de ce domaine dédié aux points de contact sur les parallélépipèdes (en rouge, ellipse de corrélation). Le bloc jaune représente la paume de la main (Touvet, et al. 2011).

Recrutement des doigts nécessaires à la saisie

Une caractéristique intéressante du mouvement de saisie humain réside dans le choix d'une combinaison particulière de doigts à utiliser pour saisir l'objet. La plupart des études comportementalistes se focalisent sur un seul type de saisie (Cesari et Newell 1999, Arbib, Iberall, et al. 1985, Iberall et Arbib 1990, Gentilucci, Caselli et Secchi 2003, Paulignan, Frak, et al. 1997), obligeant même parfois les sujets à adopter une solution qui ne leur serait pas naturelle afin de mettre en lumière un mécanisme particulier du SNC (Begliomini, Caria, et al. 2007) ; finalement la considération du mécanisme de recrutement des doigts est marginale lors de l'étude du mouvement de saisie (Johansson 1996) alors qu'il va directement influencer la stabilité de la prise et la manipulabilité de l'objet.

Même les taxonomies élaborées telles que celle proposée par Cutkosky (Cutkosky 1989) s'appuient principalement sur la paire pouce-index, à laquelle vont venir se greffer les autres doigts « secondaires » (Cesari et Newell 1999, Arbib, Iberall, et al. 1985, Iberall et Arbib 1990) (voir chapitre I, section 3.a)). Cependant, force est de constater que ce n'est pas toujours le cas dans la prise naturelle : certaines personnes, à commencer par les enfants, n'utilisent que peu l'index pour verrouiller leur prise sur un objet, lui préférant le majeur et/ou les deux derniers doigts en utilisation conjointe avec le pouce ; dans d'autres cas, l'individu va laisser l'index de côté pour former une pince bidigitale pouce-majeur afin d'effectuer une prise de précision (voir chapitre IV, section 5.c)(Sartori, Straulino et Castiello 2011).

L'auriculaire quant à lui n'a été que très peu étudié, ceci étant probablement dû à sa très forte versatilité d'utilisation entre les sujets, mais aussi aux lois ayant établi que trois contacts (donc trois doigts) sont suffisants pour assurer une prise stable, et quatre pour permettre une manipulation dans l'espace de la main (Gazeau, Zeghloul, et al. 2007). L'étude de Cesari et Newell (Cesari et Newell 1999) montre que dans une tâche de saisie pouvant impliquer jusqu'à cinq doigts les configurations de prise les plus utilisées sont celles recrutant deux ou cinq doigts, ce qui prouve que l'auriculaire est tout sauf inutile (voir aussi Sugaiwa, et al. 2009). Dans cette même étude, une relation entre certaines propriétés de l'objet (typiquement sa longueur et sa masse) et le nombre de doigts recrutés pour sa saisie est proposée. Nous nous sommes inspirés de cette relation pour faire apprendre à la MU19 une fonction liant la longueur L et la largeur W de l'objet et les dimensions de la paume qui leur correspondent, ceci résultant dans le nombre de doigts à utiliser pour saisir l'objet.

e) Sous-système dédié à la Saisie (Grasp Subsystem)

Une fois l'emplacement des points de contact établi, il reste à déterminer la configuration articulaire de chaque doigt qui permettra de l'atteindre. Cette partie du problème est résolue par un sous-réseau par doigt, les cinq constituant le sous-système dédié à la saisie et dont le rôle est d'émuler le modèle cinématique inverse de la main complète. Ces sous-réseaux sont composés d'une unité d'appariement « haut-niveau » s'appuyant sur vingt unités « bas-niveau ». Pour plus de clarté nous n'allons détailler ci-dessous que le sous-réseau dédié au pouce, dont l'unité « haut-niveau » est la MU1 et les « bas-niveau » sont les MUs 20 à 39 (Figure III-22).

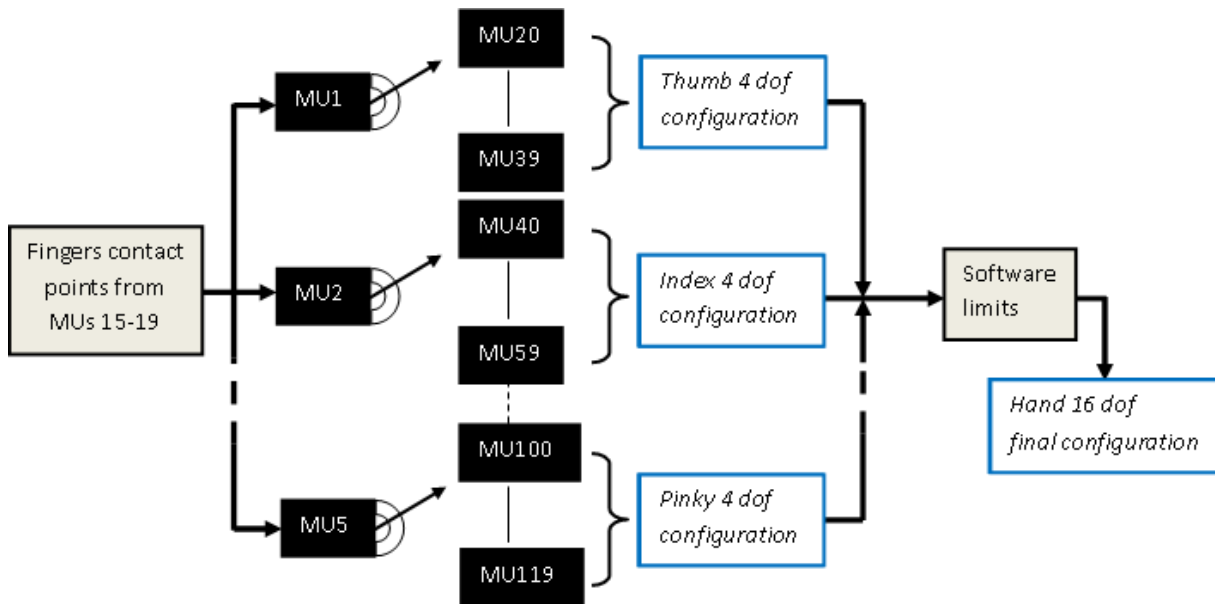


Figure III-22. Le sous-système générant la configuration de prise de l'objet, constitué de cinq sous-réseaux dédiés chacun à la résolution du problème cinématique inverse d'un doigt (Touvet, et al. 2011).

La MU1 agit comme un sélecteur pour les MUs « bas-niveau » ; elle a appris la correspondance entre les positions du point de contact dans l'espace et les identifiants des MUs « bas-niveau » qui fournissent la meilleure solution à chaque portion du problème inverse (c'est-à-dire celles dont la distance euclidienne à la consigne est la plus faible).

Les MUs « bas-niveau » (20 à 39) résolvent le problème cinématique sans le calculer explicitement, grâce à leur phase d'apprentissage où a été établie la relation directe entre chaque configuration articulaire et la position du point terminal qui en résulte. Pour ce faire, le domaine de travail du doigt a été échantillonné en 8000 points puis segmenté en 20 plans d'abduction/adduction, chacun étant assigné à une MU (Figure III-22). Chaque point a ensuite été soumis au modèle cinématique direct et ce vecteur de sept données (quatre ddl du doigt plus trois composantes spatiales) a été injecté dans la MU qui lui correspond.

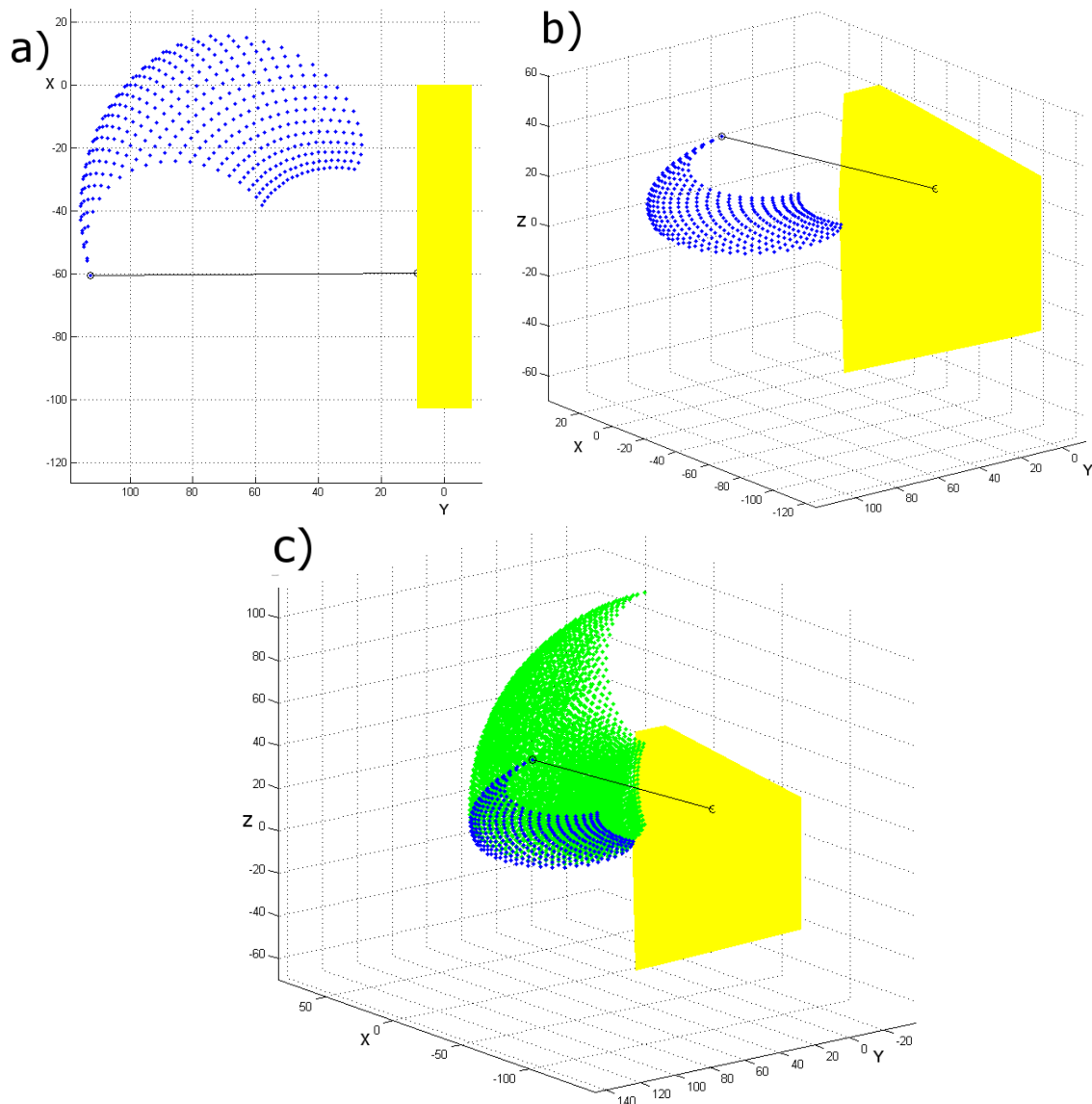


Figure III-23. Sous-espace de travail du pouce (flexion/extension pour une valeur donnée d'abduction/adduction) (Touvet, et al. 2011).

Le polygone jaune représente la paume, la ligne noire relie le point d'origine du doigt à son extrémité pour une configuration articulaire donnée (pouce en extension maximale), et les points bleus correspondent aux 200 échantillons du sous-espace.

a) Vue du sous-espace de flexion/extension dans le plan XY (flexion vers le haut, extension vers le bas) ; b) Le même sous-espace vu en 3D ; c) L'espace de travail complet (les points verts représentent les échantillons appartenant aux autres sous-espaces).

En résumé, chacune des 20 MUs « bas-niveau » a appris le domaine de flexion/extension du doigt pour une valeur d'abduction/adduction donnée (voir Figure III-23). Cette méthode a requis l'utilisation de beaucoup d'unités, mais en contrepartie a grandement allégé le coût computationnel de notre modèle ; en multipliant les unités nous divisons d'autant l'étendue des données à apprendre par chacune, et ainsi facilitons la convergence rapide vers une solution.

Cette approche diffère de celle menée dans les travaux du projet PALOMA (Zollo, Eskiizmirli, et al. 2008), où il a été montré qu'une seule unité pouvait être assignée à chaque doigt pour approximer la solution au problème cinématique inverse sans mouvement d'abduction/adduction ; cependant cela requerrait un nombre de champs récepteurs par unité bien plus important, et donc impliquait une phase d'apprentissage bien plus longue, une charge de calcul très lourde et une erreur en position plus importante que celle de notre système :

- erreur moyenne en position du modèle précédent : 9mm pour le pouce, 6mm pour les doigts longs ;
- erreur moyenne en position du modèle proposé : 4mm pour le pouce, 1.3mm pour les doigts longs.

La fonction de transfert entre les quatre angles assignés aux différents ddl d'un doigt et la position du point terminal de ce doigt peut être exprimée par un modèle géométrique direct classique, composé d'une série de transformations homogènes (voir Annexe 2)

(Équation III-21)
$$MU\ low - level_{output} = T_{Rp,1} * T_{1,2} * T_{2,3} * T_{3,4} * T_{4,5} * T_{5,6} * T_{6,end_eff}$$

Ainsi, à chaque fois qu'un ensemble de points de contact est envoyé au sous-système de la saisie, il est d'abord réparti dans les différentes unités d'appariement « haut-niveau » assignées à chaque doigt, qui elles vont sélectionner l'unité « bas-niveau » la plus adéquate au calcul des angles articulaires pour chacun des doigts, laquelle va effectuer la transformation correspondant au modèle cinématique inverse ; les différentes solutions sont ensuite réunies pour former un vecteur correspondant à la configuration de la main complète.

f) Sous-système dédié à la pré-conformation (Preshape Sub-system)

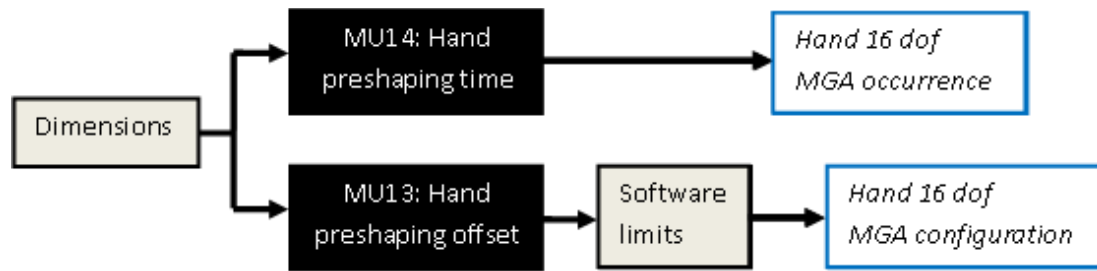


Figure III-24. Le sous-système générant la configuration de conformation de la main, à la fois du point de vue spatial (MU14) et temporel (MU15) (Touvet, et al. 2011)..

Jusqu'à présent nous nous sommes focalisés sur la configuration de prise finale qui va permettre de saisir l'objet afin de le manipuler, que ce soit du point de vue de la position d'approche ou de celui de la consigne articulaire des doigts. Cependant cette configuration est le résultat d'un mouvement complet depuis une position de départ neutre, en l'occurrence la « position zéro » de tous les axes contrôlés (6 pour le robot, 16 pour la main ; voir Figure III-15), et qui présente un caractère stéréotypé chez l'homme. Nous avons voulu donc intégrer ce comportement (la « phase de transport » (Paulignan, MacKenzie, et al. 1991, Paulignan, Jeannerod, et al. 1991, Paulignan, Frak, et al. 1997 (Jeannerod, Boussaoud et Jacob 1998) à travers le développement d'un sous-système qui lui serait dédié (Figure III-24).

Pendant le mouvement d'atteinte, la main est pré-conformée à l'objet qu'elle va saisir : la configuration des doigts – principalement leur écartement relatif maximal (*Maximum Grip Aperture*, MGA)- est déterminé en fonction des dimensions estimées de l'objet et de l'axe de saisie adopté (Gentilucci, Caselli et Secchi 2003, Wing, Haggard et Flanagan 1996) de manière à permettre à la main d'approcher l'objet sans qu'il y ait collision, pour qu'ensuite elle se referme sur lui naturellement. Cet écartement a été implémenté dans la MU13 (Équation III-22) sous la forme d'une relation linéaire qui va donner en sortie un vecteur de cinq composantes (une par doigt) venant moduler la configuration finale de la main ; ce type d'approche n'est pas commun dans le domaine de la robotique, bien qu'il soit clairement identifié chez l'homme par des études comportementales portant sur les gestes d'atteinte et de saisie (Santello et Soechting 1998).

(Équation III-22)
$$MU13_{output} = aK + b, \text{ avec } K = dim_{obj}$$

De la même façon mais en ne prenant en compte cette fois que la largeur de l'objet W nous avons implémenté l'occurrence de l'écartement maximal des doigts lors de la phase de transport avec la MU14. Les études comportementales sur le mouvement d'atteinte placent cette occurrence dans la seconde moitié de la durée totale du mouvement ; les données sont variables quant à son apparition exacte, certaines la limitant au troisième quart du mouvement total, d'autres bien plus tardivement (Jeannerod 1984, Rosenbaum, et al. 2001, Gentilucci, Caselli et Secchi 2003). Encore une fois, la fonction de transfert apprise ici peut s'exprimer par une relation linéaire entre la durée du mouvement (fixée par nos soins dans le simulateur) et la dimension de l'objet considéré (Jeannerod 1988)(Équation III-23).

(Équation III-23)
$$MU14_{output} = aK + b, \text{ avec } K = W_{obj}$$

4. Résultats

a. Apprentissage des Unités d'Appariement

Durant cette phase chaque unité a été entraînée dans le but de converger vers la solution du problème auquel elle était dédiée, avec comme variable d'ajustement le nombre de ses champs récepteurs (voir Figure III-13 pour une courbe d'apprentissage typique). Cette phase d'apprentissage s'appuie sur la recherche de corrélation maximale entre les entrées et les sorties théoriques fournies à la MU, corrélation basée sur le calcul de la distance diagonale entre ces deux domaines (voir section 3, i).

Les résultats de la phase d'apprentissage de l'architecture de contrôle sont présentés dans le Tableau III-3, avec la description de la fonction de chaque unité, le nombre de champs récepteurs qui lui ont été assignés, la dimensionnalité de ses espaces d'entrée et de sortie et enfin l'erreur obtenue après convergence.

On peut ainsi constater la grande disparité du nombre de RFs, directement liée à la difficulté relative de la tâche à apprendre (rapport entre le nombre d'entrées et de sorties, taille des espaces à traiter, continuité des données d'entrée...). Le nombre de RFs assignés à chaque MU pendant la phase d'apprentissage peut être considéré comme un indicateur de la source probable d'erreur ; en effet, plus il est élevé et plus l'unité a du faire face à un problème complexe et donc potentiellement avoir des difficultés à converger vers une solution. Les erreurs sont discutées dans la section b.

Tableau III-3. Assignment des MUs, nombre de RFs, dimensions des espaces d'entrée (I) et de sortie (O), erreur finale. Légende : # = nombre de Rfs = Champs récepteurs (Receptive Fields); V. = Vertical; H. = Horizontal; Cyl. = Cylindre; UA = Unité Arbitraire ; MGA = Ecartement relatif maximal (Maximum Grip Aperture); moy. = moyenne.

# MU	Fonction	# RFs	I/O dim.	Erreur
1	Pouce : unité haut niveau	9	3/1	3.861 UA
2	Index : unité haut niveau	38	3/1	3.462 UA
3	Majeur : unité haut niveau	37	3/1	2.703 UA
4	Annulaire : unité haut niveau	11	3/1	3.048 UA
5	Auriculaire : unité haut niveau	8	3/1	3.926 UA
6	Orientation de l'axe d'opposition	18	2/1	0.006 rad
7	Orientation d'approche	86	2/1	0.005 rad
8	Orientation du type de saisie	11	2/1	0.226 rad
9	Azimuth de la main	4	1/1	$6.6 \cdot 10^{-8}$ rad
10	Prisme/V. Cyl. : position d'atteinte	72	2/3	0.119 mm
11	Sphère : position d'atteinte	72	2/3	0.015 mm
12	H. Cyl. : position d'atteinte	68	2/3	0.020 mm
13	MGA	3	1/5	$2.25 \cdot 10^{-10}$ mm
14	Occurrence du MGA	4	1/1	$6.48 \cdot 10^{-8}$ %
15	Prisme : points de contact	1144	10/3x5	8.481 mm
16	Sphère : points de contact	1072	10/3x5	5.033 mm
17	V. Cyl. : points de contact	1192	10/3x5	8.928 mm
18	H. Cyl. : points de contact	1204	10/3x5	8.863 mm
19	Nombre de doigts recrutés	13	2/1	0.2108 UA
20-39	Pouce : unités bas niveau	7.95 (moy.)	3/4	4.215 mm (moy.)
40-59	Index : unités bas niveau	9.65 (moy.)	3/4	1.337 mm (moy.)
60-79	Majeur : unités bas niveau	9.65 (moy.)	3/4	1.323 mm (moy.)
80-99	Annulaire : unités bas niveau	9.20 (moy.)	3/4	1.344 mm (moy.)
100-119	Auriculaire : unités bas niveau	9.65 (moy.)	3/4	1.327 (moy.)

b. Evaluation de l'erreur du simulateur

Afin de procéder à une évaluation détaillée des performances de notre système nous avons calculé l'erreur de positionnement correspondant à chaque partie des chaînes cinématiques simulées (tant pour le robot que pour la main). De notre point de vue, ce type d'erreur peut avoir deux causes : une imprécision dans la résolution du problème géométrique inverse, et une accumulation des erreurs d'apprentissage (c'est-à-dire d'approximation de fonctions) de chaque MU impliquée dans la chaîne considérée.

i) Modèles géométriques du robot porteur

Nous avons vérifié dans un premier temps que le module de résolution du problème géométrique inverse fourni par la *Kuka Control Toolbox* (et modifié par nos soins, voir section 3. b) ne générait pas d'erreur de positionnement lors de la phase d'approche. Pour ce faire nous avons comparé la matrice de transformation homogène théorique du point terminal établie via le modèle direct du robot (voir Annexe 1) avec celle obtenue par l'utilisation conjointe des modèles inverse et direct ; l'erreur ainsi obtenue s'est avérée nulle, tant en position qu'en orientation (ordre de grandeur : $\varepsilon < 10^{-8}$ mm/°).

ii) Evaluation de l'erreur des unités d'appariement

L'erreur correspondant à chaque unité est présentée dans le Tableau III-3. Nous avons utilisé une Unité Arbitraire conventionnelle (UA) afin d'exprimer l'erreur des MUs ayant pour sortie un scalaire sans dimension (les unités haut-niveau MU1 à 5, celle de recrutement des doigts MU19) ; l'erreur des unités bas-niveaux (MU20 à 119) a été établie suivant la moyenne des erreurs de positionnement de chaque groupe de 20 MUs, de même que le nombre de RFs utilisés par ces unités.

iii) Phase d'atteinte

Dans le prolongement de la validation des modèles géométriques du robot nous avons vérifié la qualité des consignes générées par le sous-système dédié à l'atteinte (section 3. d, ii) et évalué l'erreur de chaque unité qui le compose (MU6 à 12) ; cette erreur s'est avérée très faible, à savoir inférieure à 1 millimètre pour les MUs en charge du placement de la main et à 0.2 radians pour les MUs traitant de son orientation (voir Tableau III-3).

iv) Phase de saisie

Pour ce qui est du système de saisie l'erreur s'est avérée plus importante (entre 5mm et 8.9mm), aussi nous avons cherché à déterminer quels pouvaient en être les facteurs en examinant les erreurs respectives de chaque unité qui le compose (Figure III-25). Celle-ci montre les performances du processus complet et la contribution des différentes unités d'appariement à ces performances, suivant le type d'objet saisi ; nous souhaitons examiner dans quelle mesure les prises testées s'avéraient efficaces et comment les deux groupes de MUs (avant et après le pseudo-modèle inverse) contribuaient à ces prises. Ces résultats ont été obtenus sur un groupe de test constitué de 10000 essais pour chaque type d'objet, où nous avons fait varier les dimensions de manière aléatoire ; bien que la main physique ne comporte que quatre doigts notre simulateur peut générer des prises à cinq doigts (l'auriculaire étant placé de manière symétrique par rapport à l'annulaire), et c'est ce que nous avons fait pour ces essais.

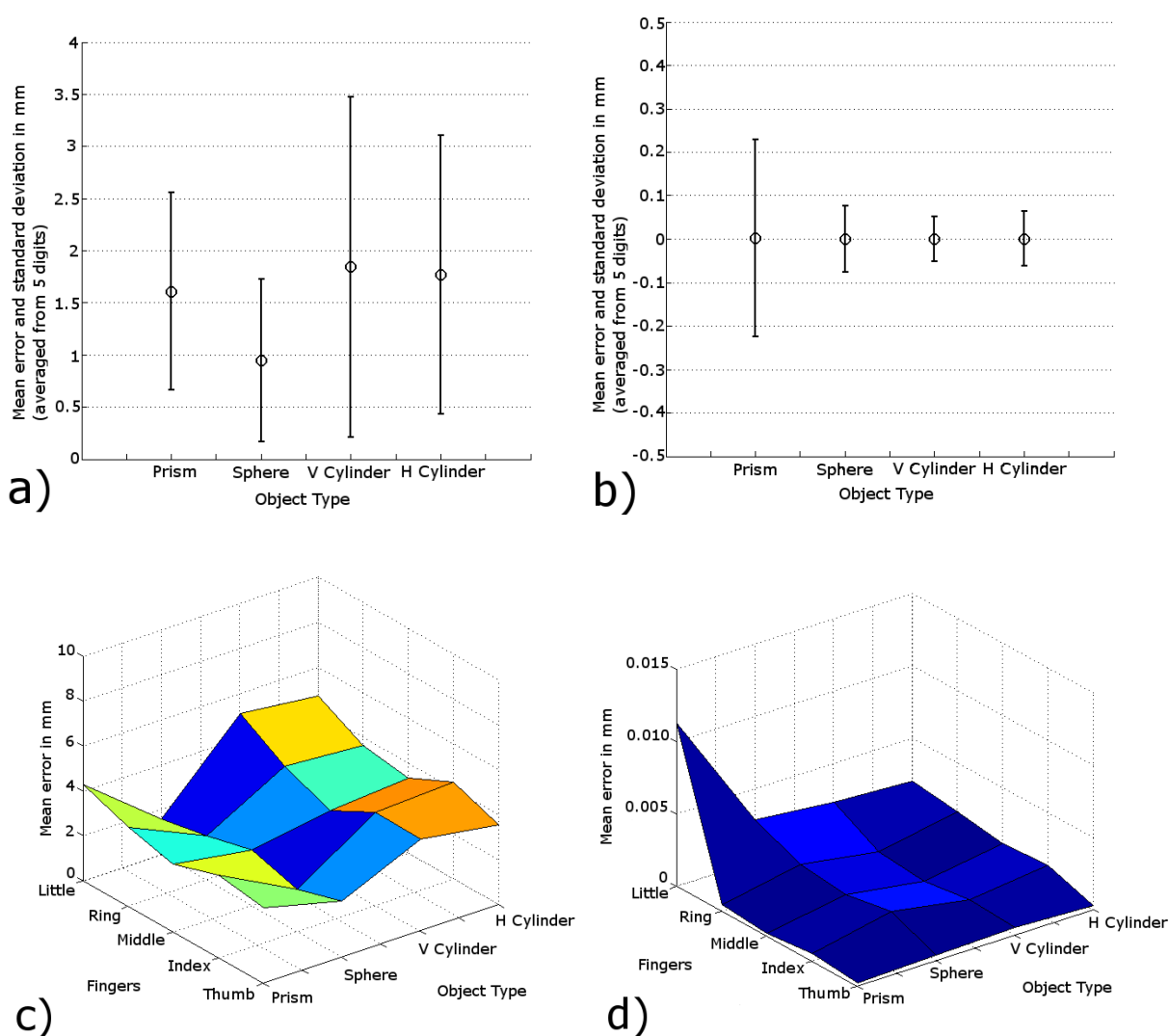


Figure III-25. Erreur en position en fonction du type d'objet, cumulée sur les deux groupes de MUs dédiés à la génération des points de contact et à la résolution du problème géométrique inverse (Touvet, et al. 2011).

a) Erreur des MUs dédiées aux points de contact (avant utilisation du pseudo-modèle inverse), moyennée sur les cinq doigts (MUs 15 à 18). b) Erreur du sous-système dédié à la saisie (après utilisation du pseudo-modèle inverse), moyennée sur les cinq doigts (MUs 20 à 119). c) et d) Les mêmes données que a) et b) sont ici détaillées en fonction de la contribution de chaque doigt.

Les Figure III-25 a) et c) montrent la différence entre les points de contact théoriques et les points générés par le sous système qui leur est dédié, tandis que les Figure III-25 b) et d) nous montrent la différence entre les points de contact envoyés par le sous-système dédié et les points générés par le sous-système de la saisie. Nous pouvons voir que l'erreur relative à la génération des points de contacts (avant résolution du problème géométrique inverse, Figure III-25 a et c) est plus importante que celle due au pseudo-modèle inverse (Figure III-25 b et d), et ce de manière très significative ; cela veut dire que dans notre système l'efficacité des prises va dépendre avant tout du sous-système dédié aux points de contacts et non de celui dédié à la saisie. Parmi les quatre types d'objet considérés les cylindres sont ceux engendrant le plus fort taux d'erreur (Figure III-25 a), et ce de manière homogène sur les cinq doigts (Figure III-25 c).

c. Validation sur site expérimental

Nous avons procédé à la validation de notre simulateur en testant les solutions qu'il propose sur le site expérimental de l'Institut Pprime. Les objets utilisés pour mener à bien ces tests ont été fabriqués en carton (pour les parallélépipèdes), en mousse ou caoutchouc (pour les sphères) et en aluminium creux (pour les cylindres), avec une masse allant de 10g à 55g ; chaque type d'objet a été décliné en deux tailles, correspondant à deux jeux de dimensions différents (voir Tableau III-4). Afin de faciliter le contact les extrémités des doigts furent couvertes d'un fin revêtement caoutchouc.

Tableau III-4. Dimensions des objets utilisés lors de la validation expérimentale du simulateur. Les dimensions sont réparties comme suit :
i) parallélépipèdes: dim. 1 = longueur L, dim. 2 = largeur W, dim. 3 = hauteur H;
ii) sphères: toutes dimensions = diamètre de l'objet;
iii) cylindres: dim. 1 et 2 = diamètre de l'objet, dim. 3 = hauteur H. L'angle suivant Y_{table} correspond au fait d'avoir un objet vertical (0°) ou horizontal (90°).

Type	nom	dim. 1 (mm)	dim. 2 (mm)	dim. 3 (mm)	angle sur $Y_{table}(^\circ)$
Parallélépipède	S Box	77	38	88	0
	B Box	60	67	142	0
Sphère	VS Sph	40,5	40,5	40,5	0
	S Sph	66	66	66	0
Cylindre Vertical	S VCyl	40	40	95	0
	B VCyl	66	66	115,6	0
Cylindre Horizontal	S HCyl	40	40	95	90
	B HCyl	66	66	115,6	90

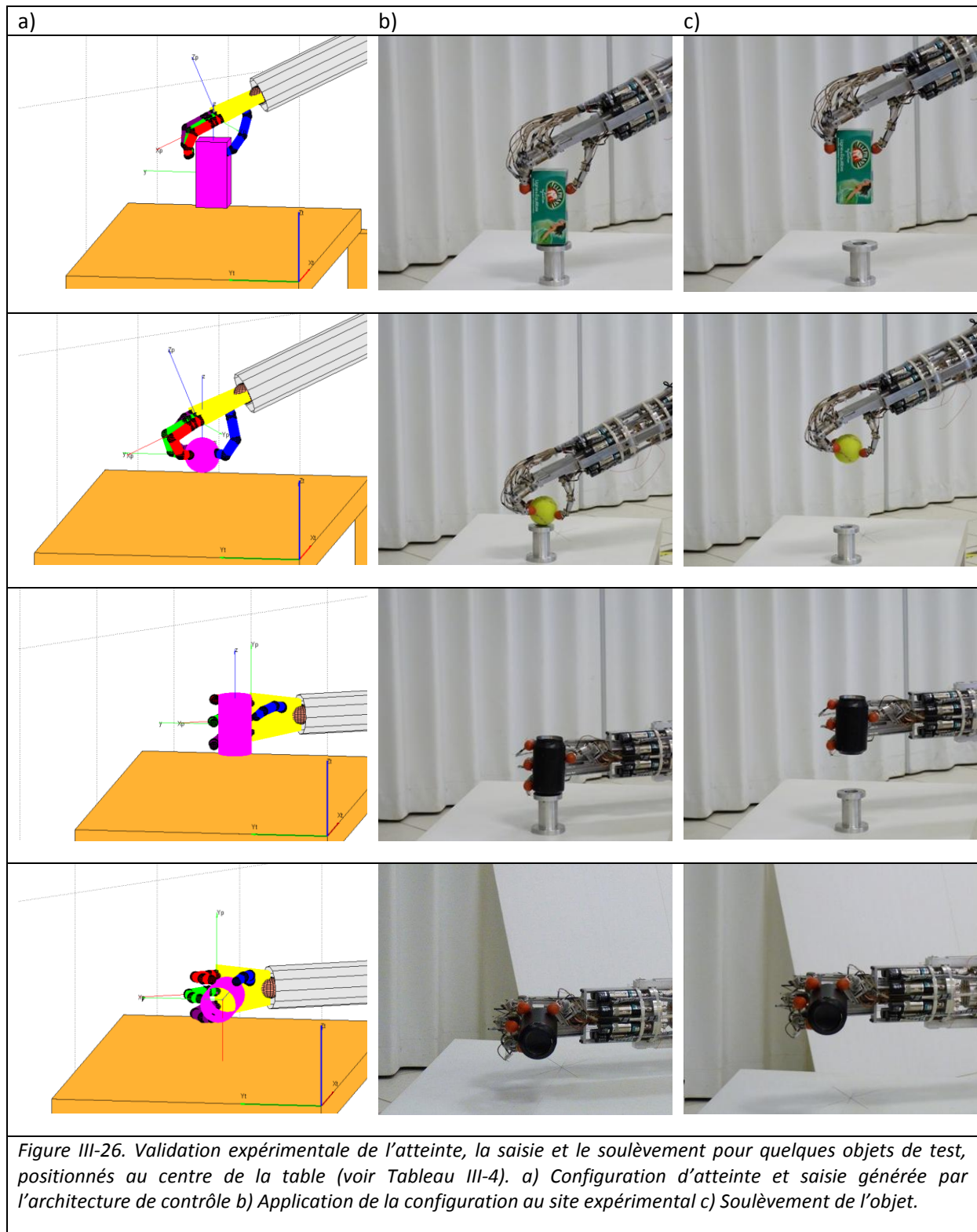
Les prises générées par notre approche de contrôle biomimétique ont été appliquées directement au robot porteur et à la main mécanique, sans aucun ajustement. Comme nous ne disposons pas de mesure des forces appliquées nous n'avons pas pu évaluer la qualité des prises suivant les critères utilisés habituellement ; nous avons donc simplement vérifié si les configurations de prises fournies par notre système permettaient d'accomplir avec succès l'atteinte, la saisie et le soulèvement des différents objets, et ce suivant plusieurs conditions (voir sections suivantes) liées à l'objet (position, orientation, dimensions) mais aussi à la consigne (type de prise). Nous avons ensuite affiné ces résultats en examinant le nombre de doigts en contact effectif avec l'objet afin d'établir un score de qualité des prises.

g) Validation des différents objets

Dans cette condition les huit objets étaient placés sur un support (8cm de haut) au centre de la table, avec une orientation nulle autour de Z_{table} . Pour chacun d'entre eux nous avons généré une configuration de prise imposant une saisie par le dessus et une autre par le côté (voir Figure III-26 pour quelques exemples de prise, et Annexe 3 pour la totalité des configurations). Les résultats de cette condition sont présentés dans le Tableau III-5, avec l'évaluation tout-ou-rien du succès de la configuration ainsi que le score de qualité des prises. Malgré des prises ne satisfaisant pas le critère de stabilité (typiquement celles du petit cylindre) toutes les configurations ont été efficaces, et tous les objets ont été atteints, saisis et soulevés avec succès.

Tableau III-5. Résultats de l'atteinte et de la saisie des objets constituant la gamme de test, par le dessus et le côté. Les objets sont placés au centre de la table, sur un support de 8cm de hauteur, avec une orientation α_{obj} nulle. OK/NOK : succès/échec de la partie du problème considérée Score : évaluation de la prise (4 étant le nombre maximal de doigts en contact avec l'objet).

	Par le dessus			Par le côté		
	Atteinte	Saisie	Score	Atteinte	Saisie	Score
S Box	OK	OK	4/4	OK	OK	4/4
B Box	OK	OK	3/4	OK	OK	4/4
VS Sph	OK	OK	3/4	OK	OK	2/4
S Sph	OK	OK	4/4	OK	OK	2/4
S Vcyl	OK	OK	2/4	OK	OK	4/4
B Vcyl	OK	OK	3/4	OK	OK	4/4
S Hcyl	OK	OK	2/4	OK	OK	3/4
B Hcyl	OK	OK	3/4	OK	OK	3/4



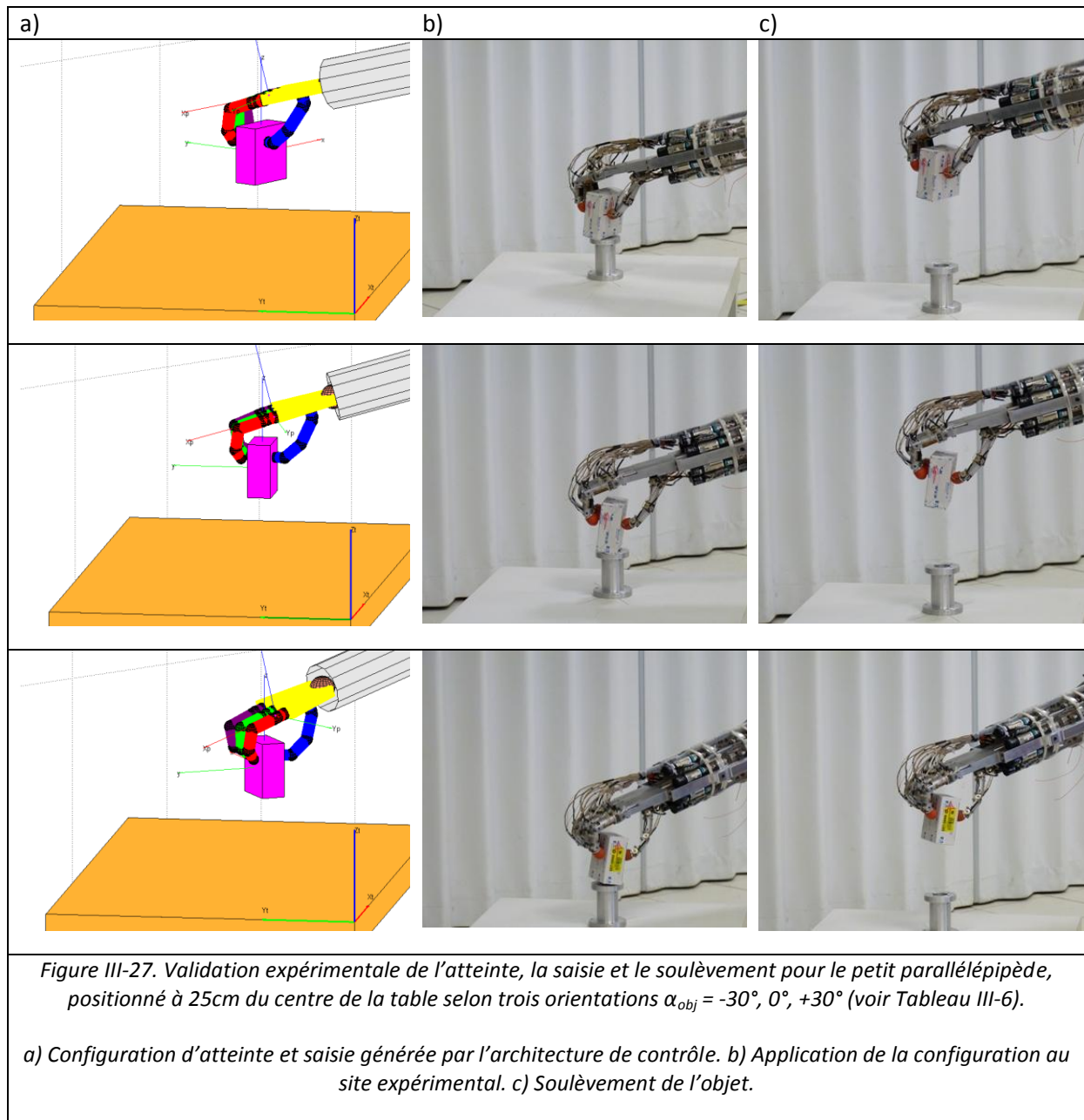
h) Validation des différentes positions et orientations

Dans cette condition nous avons voulu tester la fiabilité de notre stratégie face à des variations dans le placement de l'objet sur la table. Cette fois-ci nous n'avons utilisé que le petit parallélépipède, que nous avons placé à deux endroits (de part et d'autre du point central, de manière symétrique suivant l'axe X_{table}) et selon trois orientations, toujours sur le support (voir Tableau III-6 et Figure III-27) ; nous n'avons utilisé que les prises du dessus. Le but de ces essais était d'évaluer de manière plus précise l'efficacité des MUs dédiées à la gestion de l'orientation de la main en fonction des caractéristiques extrinsèques de l'objet, ainsi que leur fidélité par rapport aux règles d'apprentissages qui leur ont été appliquées.

Tableau III-6. Résultats de l'atteinte et de la saisie du petit parallélépipède, placé à deux endroits de la table et suivant trois orientations (voir Figure III-27), par le dessus et le côté. OK/NOK : succès/échec de la partie du problème considérée Score : évaluation sur de la prise (4 étant le nombre maximal de doigts en contact avec l'objet).

	$\alpha_{\text{obj}} = -30^\circ$			$\alpha_{\text{obj}} = 0^\circ$			$\alpha_{\text{obj}} = +30^\circ$		
	Atteinte	Saisie	Score	Atteinte	Saisie	Score	Atteinte	Saisie	Score
$X_{\text{obj}} = -250\text{mm}$									
$Y_{\text{obj}} = 0\text{mm}$									
$Z_{\text{obj}} = 80\text{mm}$	OK	OK	3/4	OK	OK	3/4	OK	OK	4/4
$X_{\text{obj}} = +250\text{mm}$									
$Y_{\text{obj}} = 0\text{mm}$									
$Z_{\text{obj}} = 80\text{mm}$	OK	OK	3/4	OK	OK	3/4	OK	OK	3/4

Une fois encore nous avons examiné la capacité de notre système à atteindre, saisir et soulever l'objet de manière efficace, et noté le nombre de doigts participant au succès de ces processus. Et une fois encore, tous les essais se sont avérés fructueux.



5. Conclusions et Discussion

Nous avons vu dans ce chapitre l'établissement d'une architecture de contrôle inspirée du comportement de l'homme, tant du niveau comportemental que structurel et computationnel. Nous avons appliqué les consignes articulaires générées par cette architecture au site expérimental, constitué d'un robot porteur 6 ddl (Atteinte) et d'une main articulée à 16ddl contrôlables (Saisie), et soulevé avec succès 8 objets différents, placés à plusieurs endroits de la table et suivant plusieurs orientations.

Cette architecture entre dans la catégorie des « approches empiriques basées sur les objets » (El-Khoury, Sahbani et Bidaud 2011) qui diffère des solutions analytiques basées sur des techniques d'optimisation mais aussi des approches empiriques basées sur l'étude du comportement humain, bien que la frontière avec cette dernière catégorie soit assez fine du fait que la plupart des lois que nous avons utilisées pour l'apprentissage sont tirées de telles études. On citera d'ailleurs le travail de Rezzoug et Gorce (Rezzoug et Gorce 2008), qui utilisent des réseaux de neurones artificiels pour apprendre le modèle géométrique inverse de la main en s'appuyant sur des enregistrements réalisés à l'aide d'un gant instrumenté. Dans une démarche similaire à la nôtre ils ont utilisé une procédure d'appariement plutôt qu'une résolution explicite de la géométrie inverse et ont divisé cette mise en correspondance entre plusieurs réseaux, chacun apprenant un sous-espace des solutions. Cependant ils n'ont pas montré d'application de ce système s'appuyant sur les caractéristiques de l'objet à saisir.

Enfin, et même cela n'a pas encore été testé, de par la souplesse de l'algorithme LWPR et la hiérarchisation que nous avons mis en place nous attendons de notre système une bonne adaptabilité quant à son application à d'autres mains mécaniques, puisque seules les unités d'appariement du sous-système dédié à la Saisie auraient besoin d'une mise à jour du modèle cinématique qu'elles ont appris ; cela ne changerait rien pour les autres sous-systèmes, qui pourraient donc être utilisés directement.

a. Etude comparée avec d'autres approches similaires

D'autres systèmes de configuration de prise prenant appui sur une connaissance empirique des caractéristiques de l'objet à saisir ont été proposés par Baysal and Erkmen (Baysal 2010), Pelossof et al. (Pelossof, et al. 2004), Gazeau et al. (J. P. Gazeau, S. Zegloul, et al. 2007), Li et al. (Li, Fu et Pollard 2007) et d'autres encore. Pour chacun de ses générateurs de prises nous pouvons trouver des points de convergence et d'autres de divergence avec notre système.

Premièrement, la méthode d'appariement diffère dans les cinq cas : analyse de base de données (Li, Fu et Pollard 2007), algorithmes génétiques (J. P. Gazeau, S. Zegloul, et al. 2007), SVM (Pelossof, et al. 2004), réseau de neurone en entrée d'un système à logique floue (Baysal 2010), et enfin l'algorithme LWPR pour ce qui nous concerne (Touvet, et al. 2011).

Ensuite, si les cinq systèmes fournissent une configuration de saisie basée sur les caractéristiques de l'objet, et ce du point de vue des paramètres cinématiques seuls (Rezzoug et Gorce 2008, Touvet, et al. 2011) ou en liaison avec les paramètres dynamiques (Baysal 2010, Pelossof, et al. 2004, Li, Fu et Pollard 2007, J. P. Gazeau, S. Zegloul, et al. 2007), seule notre approche ne passe pas par un étage d'optimisation de critère de saisie mais utilise directement les données propres à l'objet.

En troisième lieu, seules notre approche et celle de Li *et al.* (Li, Fu et Pollard 2007) prennent en considération l'orientation de la main par rapport à l'objet dans la phase d'approche, alors que les autres placent la main dans un plan parallèle à celui de l'objet ; cette caractéristique est selon nous essentielle dans une saisie bio-inspirée efficace (voir 3, d, ii).

Enfin, la plupart de ces études n'ont été évaluées qu'en simulation alors que la nôtre ainsi que celle de Gazeau *et al.* (J. P. Gazeau, S. Zegloul, et al. 2007) ont été implémentées dans un système physique, ce qui garantit leur applicabilité sur le terrain.

b. Atteinte

La contribution principale de notre travail concernant la phase d'approche a été d'intégrer de manière active l'orientation de la main dans son positionnement. En effet, la saisie humaine est caractérisée par un décalage par rapport au centre de l'objet tant du point de vue de l'orientation que de la position, et ces deux composantes sont d'égale importance dans le succès de notre préhension. Si l'on place la main suivant une orientation nulle (c'est-à-dire avec les différents plans de la paume orientée parallèlement à ceux de l'objet) le placement des doigts sur l'objet donne une configuration à la fois non-naturelle et non efficace, tandis qu'une simple élévation de la main dégage le pouce et permet une saisie souple et de bonne qualité, plaçant les articulations des doigts loin de leurs butées. Ce type de configuration correspond à la stratégie utilisée par l'homme pour adapter la conformation de sa main aux dimensions de l'objet (Cesari et Newell 1999, Santello et Soechting 1998) et se doit d'être appliquée sur toute main artificielle dont la structure est bio-inspirée.

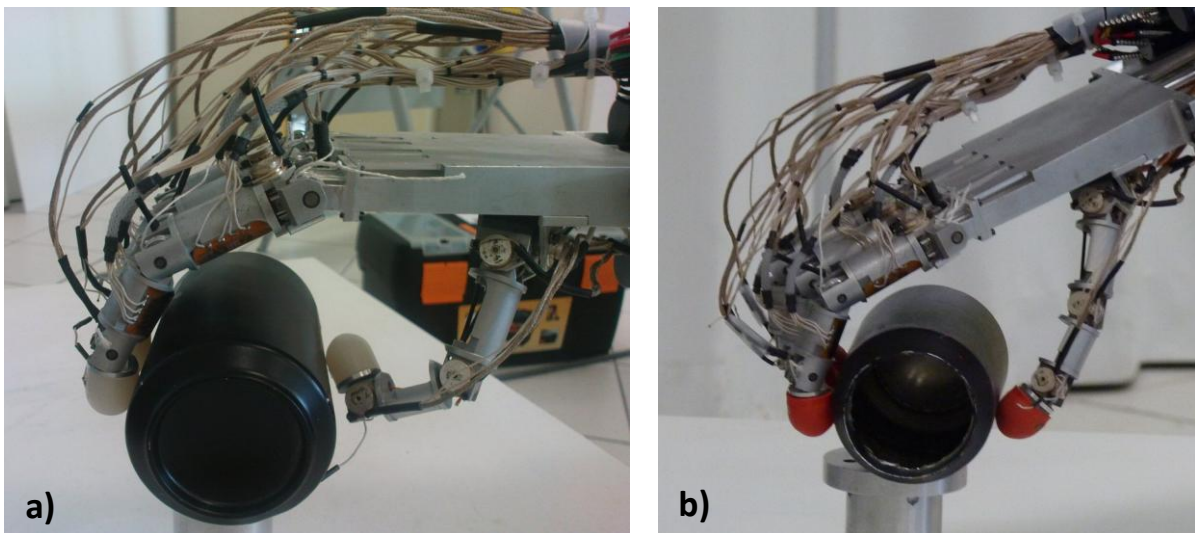


Figure III-28. Importance de l'orientation de la main sur la configuration du pouce.

a) La paume est placée horizontalement, ses trois plans sont parallèles à ceux de l'objet ; le pouce est recroquevillé et sa force de serrage s'applique en un point qui serait situé sur l'ongle chez l'homme

b) L'orientation de la main permet de dégager le pouce et les doigts, et ainsi de répartir de manière plus efficace les forces appliquées ; le tout résulte dans une prise de meilleure qualité

c. Saisie

Pour ce qui est de la phase de saisie, notre contribution a été de proposer une solution innovante à un problème impliquant une structure redondante de 16ddl (et ce même en considérant chaque doigt comme une unité indépendante), non pas en s'attachant à résoudre le problème géométrique inverse de la main mais en construisant une approximation implicite à partir du modèle direct.

A la différence d'une approche conventionnelle visant à optimiser le positionnement des doigts sur l'objet en vue de satisfaire un critère mathématique de qualité de prise (Bicchi 2002, Bicchi et Kumar, 2002, Okamura, Smaby et Cutkosky 2000), la performance de notre architecture va dépendre directement des lois utilisées lors de la phase d'apprentissage et des capacités de convergence et de généralisation des MUs qui la composent. Le fait d'utiliser de multiples unités d'appariement pour la construction de cette approximation sur l'espace de travail complet des doigts présente deux avantages. Premièrement nous évitons le problème posé par la redondance du système et la nécessaire résolution de ce problème pendant la phase d'exécution du mouvement, ce qui peut s'avérer coûteux en termes de ressources de calcul. Ensuite les données utilisées pour construire les nuages de points utilisés durant la phase d'apprentissage peuvent être aussi bien générées synthétiquement (comme ce fut le cas jusqu'à présent) que mesurées sur l'homme à l'aide d'un gant instrumenté (pour ce qui est de la configuration articulaire des doigts) couplé à un système de capture de mouvement (pour ce qui est de la position 3D de la main, voir CHAP V).

Comme cette phase d'apprentissage de nos MUs s'effectue entièrement hors-ligne, les différences dans leur nombre entre l'architecture développée précédemment (Eskiizmirli, Maier, et al. 2006, Zollo, Eskiizmirli, et al. 2008) et celle que nous venons de présenter ne peuvent pas être considérées comme un critère de performance en cela qu'elles n'influent en rien sur la phase d'exécution. En l'occurrence, l'utilisation d'un nombre important d'unités a permis de réduire de manière significative leurs nombre respectifs de champs récepteurs (voir les cinq dernières lignes du Tableau III-3) à travers l'apprentissage de données plus locales (et donc présentant une erreur relative plus faible) et par là-même de faciliter la convergence de ces unités et leur capacité de généralisation.

d. Vers une saisie « naturelle »

Lors des différentes campagnes d'essais nous avons aussi procédé à des saisies « naturelles », c'est-à-dire où nous laissons le système choisir l'orientation la plus adaptée selon lui à la saisie de l'objet entre une prise « du dessus » et « de côté » (voir la définition de la règle d'apprentissage de la MU8, section 3, d), ii)). Ces prises ont présenté des résultats variables en fonction des objets :

- prise efficace pour les sphères, similaire à celles obtenues dans les configurations forcées ;
- prise de qualité passable pour les parallélépipèdes : seulement le majeur en contact avec l'objet en plus du pouce ;
- prise non-efficace pour les cylindres.

La raison principale de ces résultats tient à la détermination de la position d'atteinte par les MUs 10 à 12 ; en effet celles-ci ne prennent pas en compte l'orientation de la paume par rapport à l'objet mais simplement les dimensions de ce dernier dans l'espace. En intégrant cette nouvelle variable par la mise en cascade de la MU8 et de celles responsables du positionnement de la main nous devrions pouvoir améliorer ce type de prise.

IV. Etude des synergies de préhension chez le sujet sain

Cette partie présente un protocole expérimental mettant en œuvre des mouvements d'atteinte et de saisie chez l'homme sain, duquel nous avons tiré une base de données visant à alimenter un schéma de contrôle reprenant les principes énoncés précédemment.

1. Résumé

Comment transférer tout ou partie du comportement humain à une machine ? Il peut sembler à première vue très simple –voire simpliste– de mesurer un mouvement et de l’appliquer à un robot ; mais dans les faits, et particulièrement en ce qui concerne le mécanisme de saisie chez l’homme, nous sommes encore loin de prendre la mesure de tous les éléments entrant en compte dans ce comportement, et ce malgré la littérature abondante de ces trente dernières années. Les travaux de Jeannerod comme ceux de Iberall et Arbib fournissent des éléments de réponse quant à l’organisation structurelle du mouvement, que ce soit au niveau de la planification, des réseaux neuronaux impliqués ou de la motricité (Jeannerod, Boussaoud et Jacob 1998, Iberall et Arbib 1990); plusieurs études récentes tendent à démontrer que malgré une architecture complexe la main humaine pourrait n’avoir que quelques degrés de liberté effectifs de par son comportement lors de la saisie d’un objet (Santello et Flanders 1998, Ciocarlie, Goldfeder et Allen 2007, Ingram, et al. 2008)(voir chapitre I, section 3, c). De plus aujourd’hui une main artificielle « parfaite » (c’est-à-dire reproduisant exactement la main biologique tant du point de vue de la structure que du contrôle) n’existe pas, et toutes les équipes travaillant sur ce thème doivent faire face à un certain nombre d’appauvris (voir chapitre II, section 2).

Le travail présenté ici vient trouver sa place dans le canevas formé par ces travaux, car bien qu’ils ouvrent la voie à une caractérisation fine des mouvements de la main il est rare qu’ils examinent plus d’un paramètre à la fois (Domalain, et al. 2008, Paulignan, Jeannerod, et al. 1991, Paulignan, MacKenzie, et al. 1991) et leurs protocoles restent souvent lacunaires sur certains points comme l’absence de mise en relation de la configuration de la main avec l’objet (voire l’absence complète de l’objet (Santello et Flanders 1998, El-Khoury et Sahbani 2010) ou encore le positionnement de la main par rapport à l’objet. L’examen de ces aspects est selon nous indispensable à une meilleure compréhension des mécanismes de saisie et de manipulation d’objets chez l’homme.

Travail effectué :

- mise en place d’un protocole expérimental afin de mesurer les angles articulaires de la main ainsi que sa position 3D,
- développement d’un modèle anatomique générique de la main humaine,
- validation des données acquises via une structure de contrôle proche de celle développée dans le chapitre III et permettant d’évaluer les lois heuristiques utilisées précédemment.

Contribution :

Le protocole expérimental mis en place nous a permis de mettre en perspective les travaux menés par d’autres équipes, notamment ceux sur lesquels nous nous étions appuyés pour construire notre premier schéma de contrôle, et ainsi ouvrir de nouvelles pistes de compréhension.

2. Méthodes : modèle anatomique générique de la main humaine.

Suite au travail présenté dans le chapitre précédent nous avons décidé d'aller chercher directement la solution au problème de saisie dans le domaine articulaire, en construisant une base de mesures chez le sujet sain. Afin de pouvoir être utilisables, ces mesures doivent être ramenées à un modèle générique de main servant de référence. Cette approche présente un double avantage : premièrement elle limite l'influence des différences anatomiques entre les sujets, et deuxièmement elle multiplie virtuellement le nombre d'objets utilisés dans la base d'apprentissage, facilitant ainsi la généralisation. Nous allons tout d'abord présenter la démarche de construction de ce modèle avant de revenir sur l'utilisation des données en elles-mêmes.

En nous appuyant sur trois études anatomiques (Chao 1989, Aydinlioglu, Akpinar et Tosun 1998, Snyder 1977) nous avons établi un modèle générique de la main humaine. Les études sur la saisie sont caractérisées par une variabilité inter-sujet assez forte, tant au niveau structurel de la main des sujets qu'au niveau comportemental. La plupart du temps la première composante est considérée comme négligeable et les expérimentateurs se focalisent sur les mouvements seuls. Cependant il a été avéré que le ratio entre la taille de l'objet et celle de la main qui le saisit a une influence sur la conformation de celle-ci (Butterworth, Verweij et Hopkins 1997, Cesari et Newell 1999), ne serait-ce que pendant la pré-conformation intervenant pendant la phase de transport. Il est donc indispensable de considérer ce ratio avant même de pouvoir analyser les mouvements effectués par un sujet. Dans notre cas, l'utilisation de ces données en tant que base d'apprentissage pour un algorithme de régression linéaire (Voir chapitre III) impose d'autant plus l'emploi d'un tel modèle afin d'en garantir l'homogénéité.

Par conséquent, le but de ce modèle est de limiter cette variabilité anatomique en ramenant toutes les mesures effectuées à une main générique. Le problème traité ici est double : comment établir le rapport entre le modèle générique et la main de chaque sujet de la manière la plus simple et efficace possible, en se basant sur la longueur des segments osseux alors que ce sont les distances interarticulaires dont nous avons besoin?

a) Relations intra-digitales

Les données présentées par Chao *et al.* dans (Chao 1989, chap.1) établissent une relation de proportionnalité entre les différentes distances inter-axiales d'un doigt (hors métacarpien) et la phalange médiane de ce doigt.

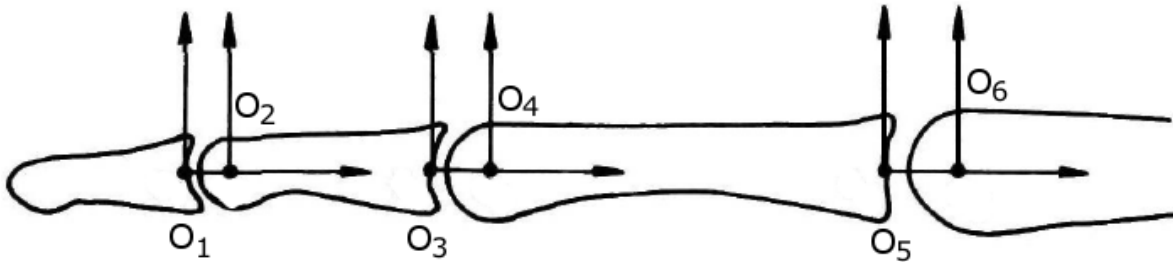


Figure IV-1. La chaîne cinématique d'un doigt (adapté de Chao 1989). Les points O sont les différents centres de rotations des articulations : les pairs pour des rotations « centrées », les impairs pour des glissements de surface.

Tableau IV-1. Distances entre les différents systèmes de coordonnées (moyenne et déviation standard ; la distance O2O3 est prise comme référence de mesure) (Chao 1989)

	O1O2	O2O3	O3O4	O4O5	O5O6
Pouce	0.243 ± 0.035	1.000 ± 0	0,338 ± 0.042	1.424 ± 0.097	0.333 ± 0.047
Index	0.224 ± 0.034	1.000 ± 0	0.288 ± 0.036	1.919 ± 0.227	0.432 ± 0.058
Majeur	0.184 ± 0.032	1.000 ± 0	0.233 ± 0.041	1.608 ± 0.087	0.365 ± 0.052
Annulaire	0.166 ± 0.031	1.000 ± 0	0.224 ± 0.041	1.576 ± 0.068	0.346 ± 0.030
Auriculaire	0.230 ± 0.042	1.000 ± 0	0.304 ± 0.046	1.797 ± 0.145	0.506 ± 0.082

Ces relations ont été établies en s'appuyant sur les scans de 15 cadavres (dont on ne connaît ni le sexe ni l'âge). Le but premier des auteurs était de mesurer les points d'insertion des tendons, les efforts qu'ils développaient et leur contribution à la force de prise globale ; ils ont aussi mesuré l'orientation des différentes articulations.

Chaque point O_1 à O_6 (voir Figure IV-1 et Figure IV-2) est présenté par les auteurs comme le centre d'un système de coordonnées intervenant dans le mouvement du doigt : les points impairs comme centres d'une surface de frottement et les pairs comme centres de rotation effectifs. Dans la suite de cette étude nous ramènerons toutes les rotations sur les seconds car descendre à un tel niveau de précision ne satisfait pas notre condition première de simplicité. En conséquence la contribution des points pairs, même si elle est avérée (van_Nierop, et al. 2007), est ici négligée par rapport à celle des centres effectifs.

De même, afin de pouvoir mettre en rapport ces résultats avec ceux présentés par la suite, nous avons ajouté deux centres au modèle de Chao et al. (O_0 et O_7 , voir Figure IV-2) (Aydinlioglu, Akpinar et Tosun 1998) et nous avons considéré comme nulle la distance entre les deux surfaces de contact d'une articulation.

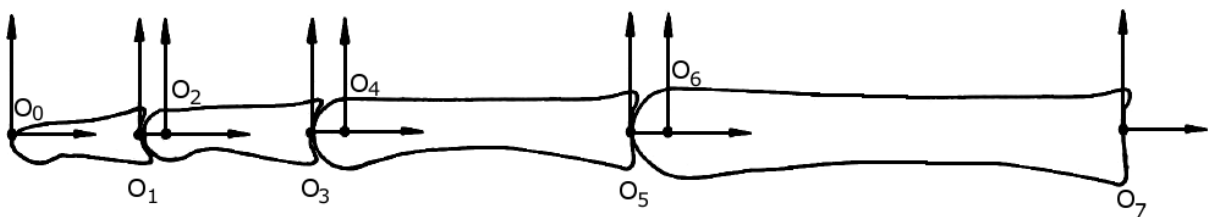


Figure IV-2. La chaîne cinématique approximée d'un doigt long (le pouce s'arrête à O_5). O_0O_1 : segment distal, O_1O_3 : segment médian, O_3O_5 : segment proximal, O_5O_7 : segment métacarpien (adapté de Chao 1989).

Nous obtenons les tableaux de relations suivants (Tableau IV-2, Tableau IV-3)

Tableau IV-2. Normalisation par rapport à $O1O2$

Segment\doigt	Pouce	Index	Majeur	Annulaire	Auriculaire
Proximal ($O5O3$)	1,243	1,224	1,184	1,166	1,23
Médian ($O3O1$)	1,762	2,207	1,841	1,8	2,101

Tableau IV-3. Normalisation par rapport à $O1O3$

Segment\doigt	Pouce	Index	Majeur	Annulaire	Auriculaire
$O6O5$	0,268	0,353	0,308	0,297	0,411
$O5O4$	1,146	1,568	1,358	1,352	1,461
$O4O3$	0,272	0,235	0,197	0,192	0,247
$O3O2$	0,805	0,817	0,845	0,858	0,813
$O2O1$	0,195	0,183	0,155	0,142	0,187

b) Relations inter-digitales

La seconde étude porte cette fois sur la relation des segments osseux entre les doigts d'une main (Aydinlioglu, Akpinar et Tosun 1998). Les points mesurés sont les extrémités des segments (notés ici A pour la tête et B pour la base) ; de la médiatrice du segment ainsi formé est déduite la largeur de l'os (distance entre les points C et D).

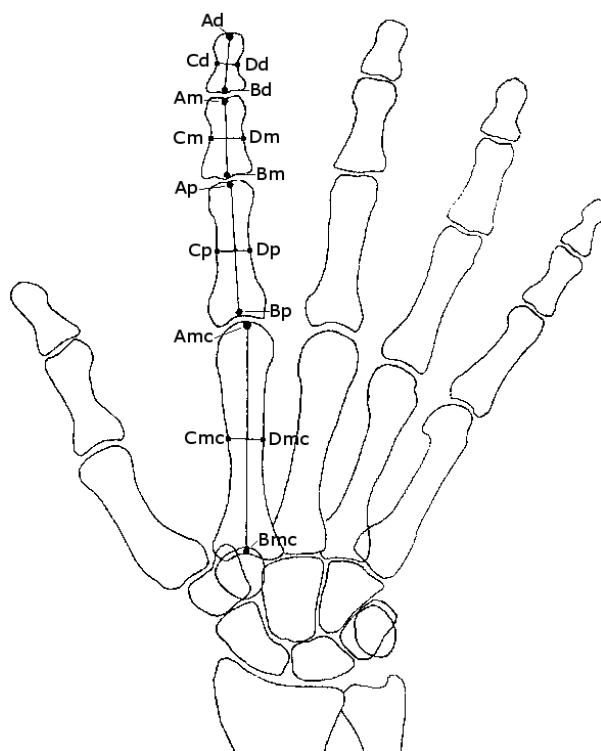


Figure IV-3. Les mesures anatomiques d'un doigt. AB : longueur de l'os, CD : largeur. d : segment distal, m : segment médian, p : segment proximal, mc : segment métacarpien (adapté de Aydinlioglu, Akpinar et Tosun 1998)

Il n'y a pas ici de normalisation par rapport à une seule donnée de référence : chaque longueur de segment est exprimée par rapport à celles des segments équivalents dans les autres doigts. Les mesures ont été effectuée sur 100 sujets (50 hommes, 50 femmes, ayant entre 20 et 40 ans) à partir de scans de leurs mains (résolution 0,1mm). De ces 100 sujets les auteurs tirent un jeu de proportions statistiquement correct (rapport à une distribution normale).

Tableau IV-4. Taille moyenne des segments (mm) (d'après (Aydinlioglu, Akpinar et Tosun 1998))

Segment\doigt	Pouce	Index	Majeur	Annulaire	Auriculaire
Métacarpien (O7O5)	44	65,5	62	56	52
Proximal (O5O3)	29,5	39	44	41	32
Médian (O3O1)	NA	23	28	26,5	19
Distal (O1O0)	21,5	17	18	18	16

Nous avons calculé à partir de ces résultats les ratios de chaque segment osseux par rapport au doigt central (majeur). Nous avons aussi établi un premier modèle générique de main en prenant la moyenne homme/femme des valeurs mesurées pour chaque os. Nous n'avons pas considéré leur largeur, puisqu'elle n'intervient pas directement dans notre modèle.

Tableau IV-5. Normalisation par rapport au majeur (donnée par Aydinlioglu, Akpinar et Tosun 1998)

Segment\doigt	Pouce	Index	Majeur	Annulaire	Auriculaire
Métacarpien (O7O5)	0,710	1,060	1,000	0,909	0,840
Proximal (O5O3)	0,671	0,893	1,000	0,930	0,710
Médian (O3O1)	NA	0,855	1,000	0,950	0,700
Distal (O1O0)	1,163	0,952	1,000	1,010	0,910

c) Mesures anthropométriques générales

La dernière étude sur laquelle nous nous sommes appuyés n'est pas focalisée sur la main (Snyder 1977). Elle consiste en une série de mesures anatomiques réalisée sur une population de 4127 sujets, classés par tranches d'âge. La catégorie qui nous intéresse est celle des 17.5-19 ans, dont on peut raisonnablement penser que la croissance a atteint son maximum.

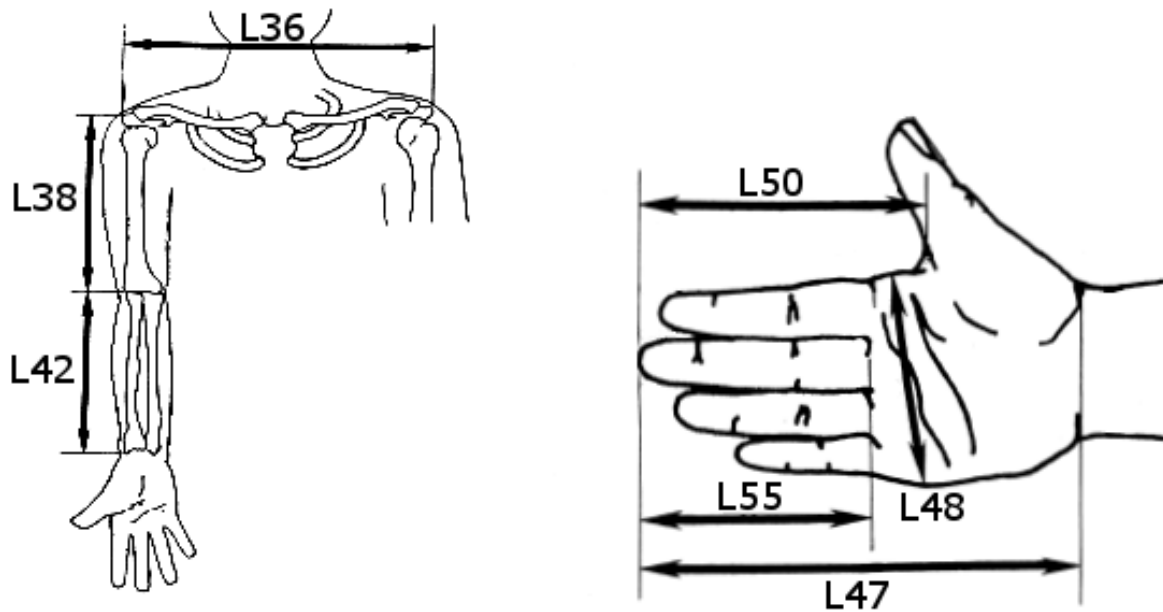


Figure IV-4. Les mesures anatomiques du bras et de la main. L36 : largeur inter-acromiale, L38 : longueur de l'avant-bras, L42 : longueur du bras, L47 : longueur de la main, L48 : largeur de la main, L50 : distance entre le crochet du pouce et l'extrémité du majeur, L55 : longueur du majeur (adapté de Snyder 1977).

Bien que cliniquement moins précise que les deux premières études présentées (puisque surfacique), celle-ci présente l'avantage de traiter tout le corps et donc le membre supérieur ; elle nous donne une vision plus globale du modèle que nous souhaitons développer, notamment la taille de la main.

Nous avons extrait de ces données les paramètres exprimés par les (Équation IV-1 à (Équation IV-4.

Distance du centre de paume par rapport au carpe :

(Équation IV-1) $L_{\text{centre/carpe}} = L47 - (L50 + L55)/2 = 78,5\text{mm}$

Distance entre l'axe de l'épaule et le centre de paume :

(Équation IV-2) $L_{\text{centre/épaule}} = L_{\text{centre/carpe}} + L38 + L42 = 647,5\text{mm}$

Distance entre l'axe du corps et l'axe de l'épaule :

(Équation IV-3) $L_{\text{épaule/corps}} = L36/2 = 189\text{mm}$

Distance entre deux doigts (le pouce et l'index sont considérés comme étant sur le même axe):

(Équation IV-4) $L_{\text{doigt1/doigt2}} = L48/4 = 21\text{mm}$

d) Généralisation

i) Modèle des doigts

En combinant les données obtenues de ces trois études nous obtenons un modèle complet de main à partir d'une seule mesure anatomique de surface : la longueur du segment médian du majeur.

Nous exprimons tout d'abord les longueurs des segments de chaque doigt en fonction du majeur, grâce aux rapports donnés dans le Tableau IV-6 sur le même principe que Tableau IV-5. Ces rapports ont été recalculés à partir des longueurs des segments donnés dans (Aydinlioglu, Akpınar et Tosun 1998) et présentent une légère différence par rapport à ceux d'origine (voir Tableau IV-7), ceci étant probablement dû au fait que les distances mesurées sont arrondies au millimètre. Quoiqu'il en soit la variation minimale (max = 3,3%) entre ces deux jeux de proportions nous permet d'exprimer toutes ces distances par rapport à la phalange médiane du majeur (voir Tableau IV-8) en nous basant sur les longueurs mesurées seules.

Tableau IV-6. Normalisation par rapport au majeur (recalculée à partir des mesures anatomiques). Le rapport de référence est indiqué en bleu.

Segment\doigt	Pouce	Index	Majeur	Annulaire	Auriculaire
Métacarpien	0,710	1,056	1,000	0,903	0,839
Proximal	0,670	0,886	1,000	0,932	0,727
Médian	NA	0,821	1,000	0,946	0,679
Distal	1,194	0,944	1,000	1,000	0,889

Tableau IV-7. Ecart entre les deux jeux de proportions (originaux et recalculés). Les valeurs maximales sont marquées en rouge.

Segment\doigt	Pouce	Index	Majeur	Annulaire	Auriculaire
Métacarpien	0,000	0,004	0,000	0,006	0,002
Proximal	0,001	0,006	0,000	0,002	0,017
Médian	NA	0,033	0,000	0,004	0,021
Distal	0,032	0,008	0,000	0,010	0,021

Tableau IV-8. Normalisation par rapport au segment médian du majeur (jeu de proportions final). Le rapport de référence est indiqué en bleu.

Segment\doigt	Pouce	Index	Majeur	Annulaire	Auriculaire
Métacarpien	1,571	2,339	2,214	2,000	1,857
Proximal	1,054	1,393	1,571	1,464	1,143
Médian	NA	0,821	1,000	0,946	0,679
Distal	0,768	0,607	0,643	0,643	0,571

Nous pouvons à cette étape calculer l'erreur d'évaluation en comparant les valeurs obtenues pour les segments O103 et O305 de chaque doigt et celles données par (Aydinlioglu, Akpınar et Tosun 1998) (évidemment celles sur O103 seront nulles ; Tableau IV-9).

Tableau IV-9. Ecart entre les données d'Aydinlioglu et al. et celles calculées via les résultats de Chao et al. (en mm) (Aydinlioglu, Akpinar et Tosun 1998, Chao 1989).

Segment\doigt	Pouce	Index	Majeur	Annulaire	Auriculaire
Proximal (O5O3)	2,301	2,471	0,463	0,091	0,454
Médian (O3O1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Ensuite nous passons des segments osseux aux distances interarticulaires ; pour cela nous retranchons à chaque segment la distance entre sa tête et son centre de rotation et nous lui ajoutons la distance entre son pied et le centre de rotation de l'os qui le précède dans la chaîne cinématique (par exemple : on part de O1O3, on lui retranche O1O2 et on lui ajoute O3O4 afin d'obtenir O2O4, segment inter-axial correspondant à la phalange médiane). Cette manœuvre est nécessaire afin de construire un modèle qui reproduise au mieux les distances inter-axiales.

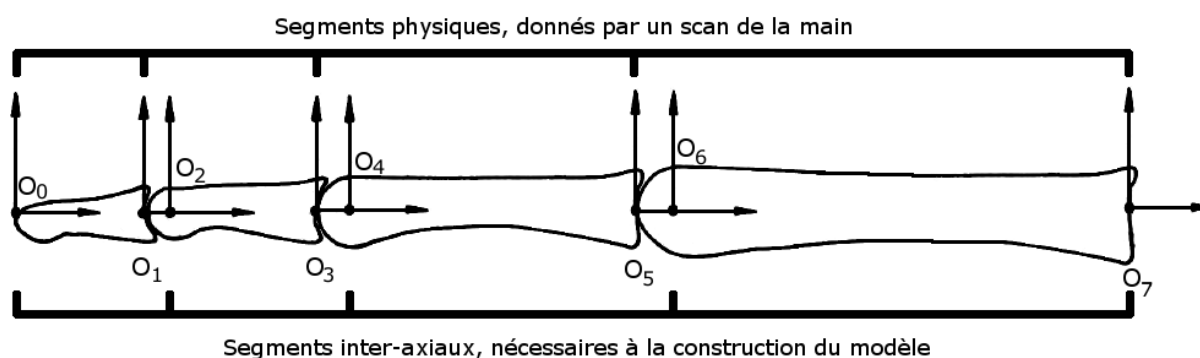


Figure IV-5. La mise en relation entre les données mesurées (chaîne du haut) et celles nécessaires (chaîne du bas) (adapté de Chao 1989).

Tableau IV-10. Les distances inter-axiales moyennes de chaque doigt (en mm). Pour les segments métacarpiens et distaux nous avons pris comme limite l'extrémité de l'os.

Segment\doigt	Pouce	Index	Majeur	Annulaire	Auriculaire
O7O6	43,881	57,382	53,368	48,136	44,184
O6O4	31,755	41,706	47,122	43,773	35,120
O4O2	NA	24,203	29,159	27,818	20,143
O2O0	27,267	21,209	22,351	21,773	19,553

De ces calculs nous tirons le tableau de relation entre la taille des segments osseux et la distance entre les axes de rotation de chaque doigt (voir Tableau IV-11).

Tableau IV-11. Rapport entre les tailles des segments osseux et les distances inter-axiales de chaque doigt. On remarquera le peu de variabilité suivant chaque ligne.

Segment\doigt	Pouce	Index	Majeur	Annulaire	Auriculaire
Métacarpien -> O7O6	0,997	0,876	0,861	0,860	0,850
Proximal -> O6O4	1,076	1,069	1,071	1,068	1,098
Médian -> O4O2	NA	1,052	1,041	1,050	1,060
Distal -> O2O0	1,268	1,248	1,242	1,210	1,222

Enfin, en mettant tout ceci ensemble nous pouvons exprimer chacune des distances inter-axiales par rapport à la mesure initiale en multipliant les facteurs du Tableau IV-9 et du Tableau IV-11.

Tableau IV-12. Rapport entre la taille du segment médian du majeur et les distances inter-axiales de chaque doigt.

Segment\doigt	Pouce	Index	Majeur	Annulaire	Auriculaire
O7O6	1,567	2,049	1,906	1,719	1,578
O6O4	1,134	1,489	1,683	1,563	1,254
O4O2	NA	0,864	1,041	0,994	0,719
O2O0	0,974	0,757	0,798	0,778	0,698

ii) Modèle de la main

En plus de la longueur des doigts, nous calculons aussi la position du centre de paume, la longueur et la largeur de celle-ci. Ces dernières sont à mettre en relation directe avec le nombre de doigts impliqués dans la saisie, selon une règle assez bien définie (Cesari et Newell 1999). Quant à la première, elle sert de base à l'analyse de nos données pour quantifier le positionnement de la main par rapport à l'objet.

Ici encore nous pouvons exprimer ces trois valeurs par rapport au segment médian du majeur, suivant les facteurs exposés dans le Tableau IV-13.

Tableau IV-13. Rapports entre le segment médian du majeur et les caractéristiques de la main.

Centre de paume	2,804
Longueur	6,571
Largeur	3,000

Outre la main, nous avons aussi besoin d'établir le rapport entre le bras du sujet et les données moyennes tirées de l'étude de Snyder *et al.* Pour cela nous effectuons simplement la mesure de la distance entre les deux acromions ainsi que celle entre l'articulation de l'épaule et l'extrémité du majeur. Nous mettons ensuite ces mesures en relation avec les longueurs L36 et (L38+L42+L47), respectivement, et nous en tirons les différents facteurs liant le sujet au modèle suivant les (Équation IV-1 à (Équation IV-4.

iii) Application aux sujets

Une fois les différents éléments relatifs au sujet calculés à partir des Tableau IV-12 et Tableau IV-13, ainsi qu'aux équations de la section 2.c, il suffit d'établir le rapport entre ces éléments et ceux du modèle générique pour pouvoir connaître immédiatement le facteur à appliquer aux objets saisis afin qu'ils aient toujours le même rapport de proportionnalité vis-à-vis de la main. Ce n'est donc plus le même objet qui sera saisi par plusieurs personnes, mais autant d'objets dont les dimensions varient de manière homogène saisis par une seule « personne moyenne ». L'avantage ici est double : non seulement nous avons ainsi limité la variabilité anatomique inter-sujet, ne laissant plus s'exprimer que celle liée à l'apprentissage de la tâche et aux différentes stratégies mises en place pour la résoudre, mais de plus les données fournies à notre algorithme présenteront une plus grande gamme de variation et donc faciliteront sa généralisation. Nous allons maintenant pouvoir nous concentrer sur l'acquisition des mesures et la construction de notre base de données.

3. Méthodes : mesures des mouvements de préhension.

L'intérêt de l'utilisation d'une telle base de données par rapport à ce que nous avons pu faire précédemment réside dans l'optimisation sous-jacente des données constituant la base d'apprentissage. En effet, nous avons jusqu'ici considéré les différents espaces de travail dans leur globalité, et ainsi fait apprendre au réseau beaucoup plus de possibilités qu'il n'était nécessaire pour la tâche de saisie à accomplir. Bien que satisfaisante cette méthode a aussi entraîné la multiplication des Unités d'Appariement nécessaires pour couvrir cet espace. Cette multiplication est d'autant plus dommageable qu'elle n'a finalement pas eu beaucoup d'influence sur le résultat : lors de l'exécution de la tâche seul un petit nombre d'Unités étaient sollicitées pour déterminer les points de contact des doigts et leur configuration articulaire (*petit nombre* relativement à la totalité du réseau), toujours les mêmes, correspondant à l'espace de travail effectif de la main (voir Figure III-21).

En examinant ce fait il apparaît clairement qu'il est possible d'optimiser la gestion des espaces de travail, et que cela permettrait d'alléger la structure de commande. Nous allons maintenant exposer le protocole expérimental qui nous a servi à constituer cette base.

a) Sujets

L'expérimentation a été menée sur 12 sujets (8 hommes, 4 femmes) dont l'âge moyen était 33 ans (max : 52, min : 22). Tous les sujets avaient la main droite comme main dominante, ne présentaient pas de trouble moteur ni physiologique et ont accepté de plein gré de participer à la campagne de mesures (voir Annexe 4 pour les documents présentés aux sujets). L'expérience a été menée en accord avec les exigences de la commission d'éthique CERES interne à l'université Paris Descartes. La raison pour laquelle nous n'avons pas recruté de gauchers était que nous n'avions à disposition qu'un gant instrumenté « droit ».

b) Consignes

Les sujets recevaient les consignes à suivre via un casque audio selon une séquence aléatoire pour chaque objet, et chaque tâche était rappelée par l'expérimentateur avant le démarrage des mesures. Le set de consignes variait en fonction de la tâche à accomplir mais était au plus constitué de trois informations : le type de saisie (« dessus » ou « côté »), la position du point-cible (« rouge », « vert » ou « bleu ») et sa distance par rapport au sujet (« proche », « moyen » ou « distant ») (voir Figure IV-6).

Les points-cibles étaient placés sur trois lignes rayonnantes approximativement autour du centre de l'épaule du sujet (*centre de référence mécanique*, Figure IV-6), et suivant un angle de -40° , 0° et 40° , respectivement pour les lignes « rouge », « vert » et « bleu ». Leur distance au sujet était ajustée par rapport à la taille de son bras (distance entre le centre de l'épaule et le centre de paume) à 50%, 70% et 90%, respectivement pour les lignes « proche », « moyen » et « distant ».

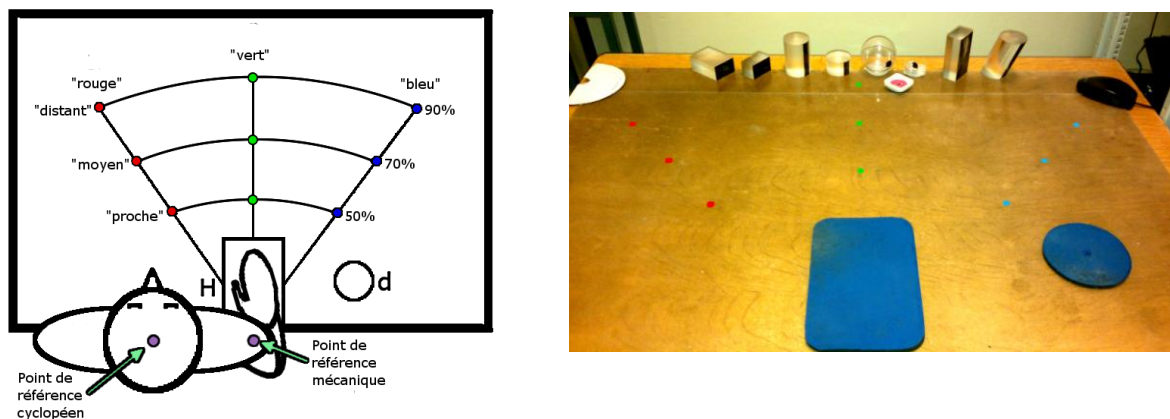


Figure IV-6. Le setup de mesure du mouvement chez les sujets sains. Les points colorés sont placés à distance variable en fonction de l'anatomie de chaque sujet tandis que les points **H** et **d** sont eux toujours au même endroit. a) Vue schématique. b) Installation réelle, avec les différents objets manipulés.

Aucun sujet n'a montré de difficulté de compréhension particulière, même ceux n'ayant pas le français pour langue d'origine. Le sujet pouvait commencer le mouvement dès qu'il entendait la consigne (pas de signal « go »).

c) Principe

L'expérience consistait à saisir et déplacer des objets de différents types et de différentes dimensions entre deux points (« pick and place »). La saisie devait s'effectuer majoritairement par la pulpe des doigts et ne pas mettre en jeu la paume de la main (nous ne disposions pas de moyen de mesurer ce type de contact). De manière générale, il était demandé au sujet d'effectuer toujours la même série de mouvements, à savoir : déplacement de la main gantée du point **H** vers l'objet, saisie de l'objet, dépose de l'objet au point-cible, retour au point **H**. Ce séquençage était très important car il nous a permis ensuite d'effectuer une segmentation automatique des données de très bonne robustesse (voir 5, a). Une passation était constituée d'une vingtaine d'essais pour explication et **1596 essais** d'expérience proprement dite ; en incluant les mesures préliminaires et l'étalonnage du gant nous sommes arrivés à une durée de 2 heures environ.

d) Objets

Nous avons fait fabriquer en tout 16 objets, regroupés par types : un groupe de cinq parallélépipèdes dont la largeur variait, un autre de cinq cylindres dont la hauteur variait, un dernier de cinq sphères dont le diamètre variait ; le dernier objet était un cylindre incliné de 20°. Les variations de dimensions des différents groupes d'objets ont été choisies cohérentes (Tableau IV-14), ceci afin de faciliter l'analyse des données.

Tableau IV-14. Caractéristiques des objets fabriqués en vue d'expérimentation. Les objets qui ont été utilisés sont indiqués en bleu.

Type	Nom	dimension 1 (mm)	dimension 2 (mm)	dimension 3 (mm)	angle (°)	masse (g)
Parallélépipède	Bck1	50	10	30	0	17,5
	Bck2	50	30	30	0	53
	Bck3	50	50	30	0	88
	Bck4	50	70	30	0	124
	Bck5	50	90	30	0	157
Cylindre	VCyl1	50	50	10	0	23
	VCyl2	50	50	30	0	68
	VCyl3	50	50	50	0	113
	VCyl4	50	50	70	0	158
	VCyl5	50	50	90	0	200
Sphère	Sph1	10	10	10	0	0,5
	Sph2	30	30	30	0	6
	Sph3	50	50	50	0	21,5
	Sph4	70	70	70	0	42
	Sph5	90	90	90	0	62
Cylindre Incliné	ICyl	50	50	90	20	216

De plus chaque objet était marqué d'une zone colorée servant de consigne de placement du pouce, c'est-à-dire que lors de la saisie le pouce du sujet devait impérativement être en contact avec cette zone. La marque colorée s'étendait sur une face entière pour les parallélépipèdes, se réduisait à une bande d'environ 1,5 cm de large courant sur toute la hauteur pour les cylindres puis à un simple point d'1,5 cm de diamètre environ pour les sphères.

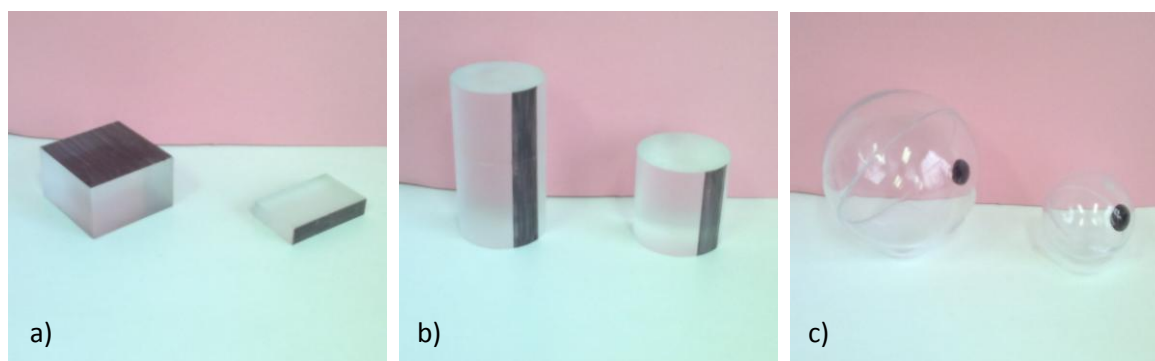


Figure IV-7 Les objets utilisés lors du premier protocole expérimental (voir section 3, a, vii). a) Les parallélépipèdes Bck2 et Bck4. b) les cylindres VCyl2 et VCyl4. c) Les sphères Sph2 et Sph4

e) Etalonnage et Mesures

Nous avons utilisé un gant instrumenté (Cyberglove, fourni par la société Immersion (Dipietro, Sabatini et Dario 2008) permettant de mesurer les différents angles articulaires de la main, couplé avec une balise 3d magnétique (Fastrack Polhemus) pour mesurer la position et l'orientation de la main dans l'espace (position 3d). Nous disposons ainsi de 22 valeurs articulaires, trois valeurs de position et un jeu de quaternions.

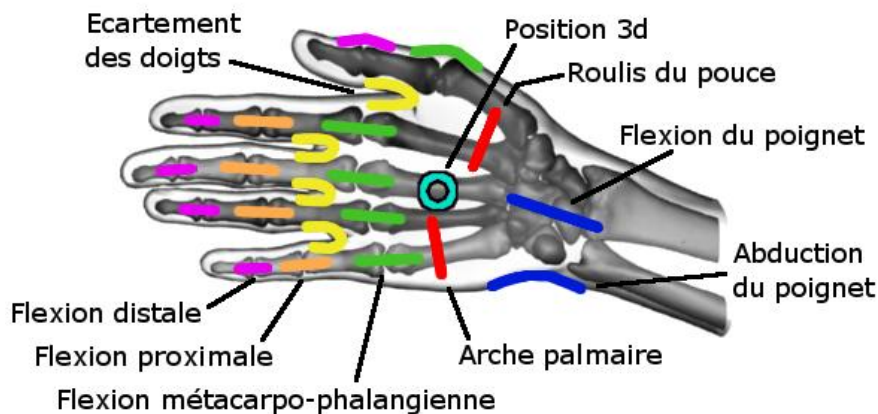


Figure IV-8. Les différents capteurs du Cyberglove répartis sur les articulations de la main (traits de couleur) ainsi que le récepteur du système Polhemus (cercle cyan). Sur la totalité des capteurs seuls 19 ont été utilisés (l'abduction et la flexion du poignet ainsi que l'arche palmaire n'ont pas été prises en compte).

Ce système est passif et non invasif, et ne présentait aucun danger pour les sujets. Les angles mesurés par le gant concernant le poignet ne nous étant d'aucune utilité dans cette application, nous avons choisi de placer la balise Polhemus non pas au niveau du carpe mais directement sur le dos de la main. Ainsi nous obtenions la position de la paume dans l'espace sans passer par une série de transformations superflues.

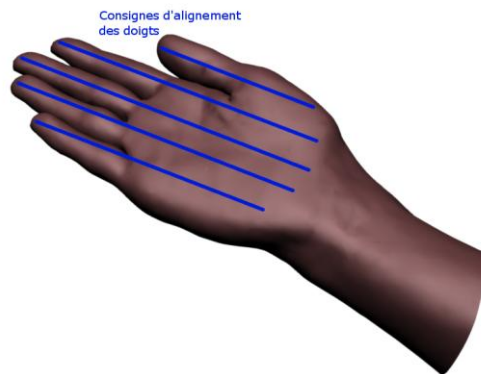
Les acquisitions en elles-mêmes étaient réalisées via un système développé à partir de travaux précédents de l'équipe (Kadouche, Mokhtari et Maier 2005) : les signaux du gant et de la balise polhemus étaient mesurés de manière synchrone, à une fréquence de 100Hz tandis que les consignes audio étaient générées aléatoirement et stockées dans un *log*.

f) Préparation de l'expérience

Lors de l'installation du sujet, la chaise sur laquelle il venait s'asseoir était réglée pour garantir son confort : la hauteur était ajustée de manière à ce que son coude droit repose naturellement sur la table, l'emplacement au sol de manière à ce que l'épaule soit dans l'axe de la main (voir Figure IV-6, a). Le bras gauche du sujet reposait à sa convenance sur sa jambe ou sur la table.

Afin de pouvoir établir les rapports de proportionnalité nous avons effectué une série de mesures anatomiques suivant ce qui a été présenté à la section précédente: longueur des phalanges de chaque doigt, distance inter-acromiale, distance entre l'épaule et le centre de paume ; ceci dans le but de calculer de manière précise les points de contact sur l'objet et d'adapter la position des cibles en fonction de chaque sujet, cibles matérialisées à l'aide de pastilles de couleur (Figure IV-6, b).

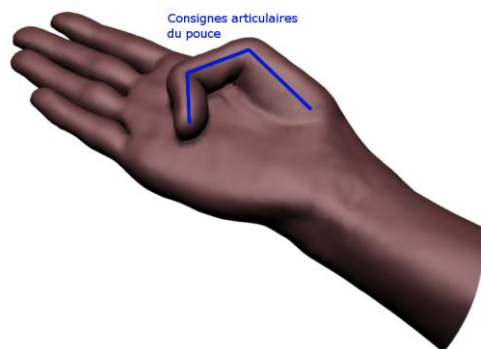
Ensuite le sujet enfilaient un premier gant, destiné à faciliter l'insertion/extraction de sa main dans le Cyberglove, puis le gant instrumenté lui-même et disposait de quelques minutes pour s'y habituer en manipulant les objets mis à disposition. Nous poursuivions en effectuant la phase d'étalonnage du gant, durant laquelle nous demandions au sujet de placer sa main dans diverses positions pré-établies et qui nous ont servies à ajuster les paramètres de mesure (Figure IV-9 et Figure IV-10)



a) Position de référence « zéro » :

La main est complètement à plat, tous les doigts sont dans le prolongement de la paume. Le pouce est plaqué contre la chaîne de l'index, avec une attention particulière sur l'orientation de sa phalange distale.

Cette position est associée à la valeur angulaire 0° pour tous les capteurs.

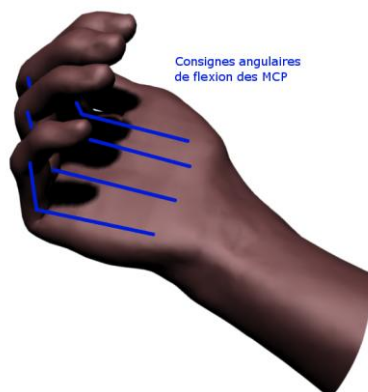


b) Position de référence « antéposition du pouce » :

Ici seuls les angles du pouce sont considérés ; le sujet doit fléchir au maximum les articulations MP et IPD, tandis que la rotation autour de TM ramène l'extrémité du pouce au niveau de la base du cinquième doigt.

Valeurs angulaires associées :

TM : 70° , MP : 45° , IPD : 90° .



c) Position de référence « flexion des MCP » :

Cette fois seuls les angles de flexion des MCP des doigts longs sont mesurés ; le sujet doit simplement replier les doigts comme s'il se tenait accroché au sommet d'un mur.

Valeurs angulaires associées :

MCP : 90° pour les quatre doigts longs.

Figure IV-9. Les trois premières positions de référence servant à l'étalonnage du gant instrumenté. a) Position zéro. b) Antéposition du pouce. c) Flexion des MCP.



d) Position de référence « flexion des IPP » :

De la même manière qu'à la position précédente, ici seuls les angles de flexion des IPP des doigts longs sont pris en compte.

Valeurs angulaires associées :

IPP : 90° pour les quatre doigts longs.

e) Position de référence « flexion des IPD » :

Dernière de la série des « flexions », cette position s'appuie seulement sur les valeurs des angles de flexion des IPD.

Valeurs angulaires associées :

IPD : 80° pour les quatre doigts longs.

f) Position de référence « ouverture » :

Dans cette dernière position, le sujet doit placer la main sur un gabarit permettant d'établir l'écartement entre ses doigts à partir du centre de convergence des axes de la main (Kapandji 2007). Nous mesurons ici l'écartement relatif de chaque doigt par rapport à son voisin, en prenant comme référence le majeur.

Valeurs angulaires associées :

TM : 45°, MCP : 15° pour l'index, l'annulaire et l'auriculaire.

Figure IV-10. Les trois dernières positions de référence servant à l'étalonnage du gant instrumenté. d) Flexion des IPP. e) Flexion des IPD. f) Abduction/Adduction des MCP.



Cette procédure a été utilisée et validée précédemment par notre équipe (Kadouche, Mokhtari et Maier 2005) ; nous avons cependant modifié quelque peu les positions de référence afin de les rendre plus cohérentes avec les butées anatomiques de la main comme par exemple celles de la flexion maximale des articulations interphalangiennes distales, décrit par Kapandji (Kapandji 2007) (Figure IV-11).

Figure IV-11. Angles de flexion maximale des articulations IPD telles que présentés par Kapandji : « l'amplitude de la flexion dans les articulations inter-phalangiennes distales est légèrement inférieure à 90 ; [elle] croit du deuxième au cinquième doigt pour atteindre 90° au niveau de l'auriculaire » (Kapandji 2007, p.222)

g) Déroulement de l'expérience

Le protocole qui nous a servi à construire la base d'apprentissage se déclinait en trois parties, présentées ci-après.

i) Tâche 1 : Exploration du domaine de travail

Il était demandé au sujet de saisir et déplacer chaque objet (Blck2 et 4, VCyl2 et 4, Sph2 et 4 ; voir Figure IV-7 et Tableau IV-14) entre la position de départ **d** et l'un des neuf points-cibles (en rouge, vert ou bleu), puis de replacer l'objet à sa position initiale en effectuant le même type de saisie (Figure IV-12). Chaque objet était utilisé tour à tour, c'est-à-dire que l'ensemble des mouvements relatif à un objet était effectué en une session, puis l'objet suivant était présenté au sujet.

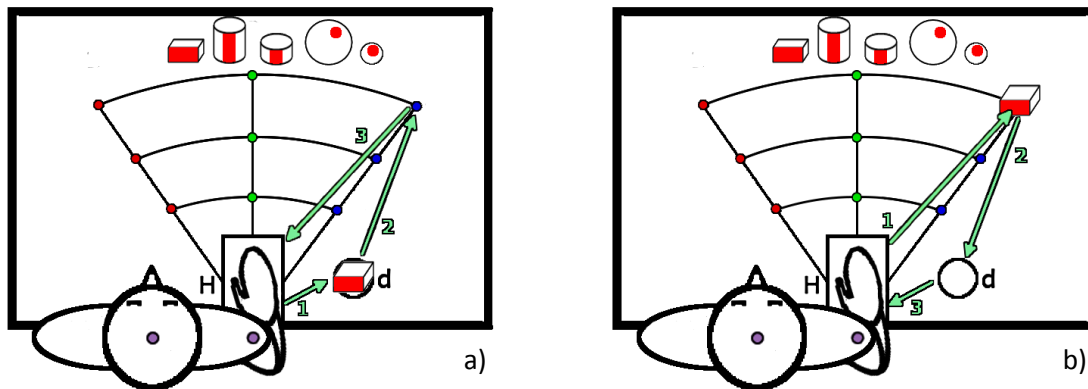


Figure IV-12. Exploration du domaine de travail. a) Déplacement de l'objet du point **d** vers l'un des points-cibles. b) Retour de l'objet au point **d**. Les mouvements sont initiés et doivent s'achever au point de repos **H**.

Nous désirions ici mesurer la configuration des doigts ainsi que la position et l'orientation de la main en fonction des différentes contraintes (géométrie de l'objet, position à atteindre, saisie par le côté ou par le dessus). L'orientation finale de l'objet au moment de la dépose représentait aussi un point d'intérêt. Le placement et l'orientation de l'objet au point **d** était vérifié par l'expérimentateur entre chaque manipulation du sujet ; le placement et l'orientation de l'objet sur les différents points-cibles était libre et avait pour but d'évaluer la justesse de la loi tirée de (Paulignan, Frak, et al. 1997) utilisée précédemment (voir chapitre III, section 3, e).

ii) Tâche 2 : Modification de l'orientation suivant un axe

Le sujet devait cette fois saisir le grand parallélépipède (Blck5) sur l'un des trois points-cible de départ et l'amener au point **d**, tout en respectant une consigne d'orientation. Les points de départ étaient ceux de la ligne médiane vue dans le setup complet (70% de la taille du bras du sujet). Le type de saisie, la position ainsi que l'orientation initiale de l'objet étaient déterminés aléatoirement ; cette dernière était choisie parmi les cinq valeurs : -90° , -45° , 0° , 45° , 90° . Son orientation finale devait toujours être de -90° (première position en haut à gauche sur la Figure IV-13, a).

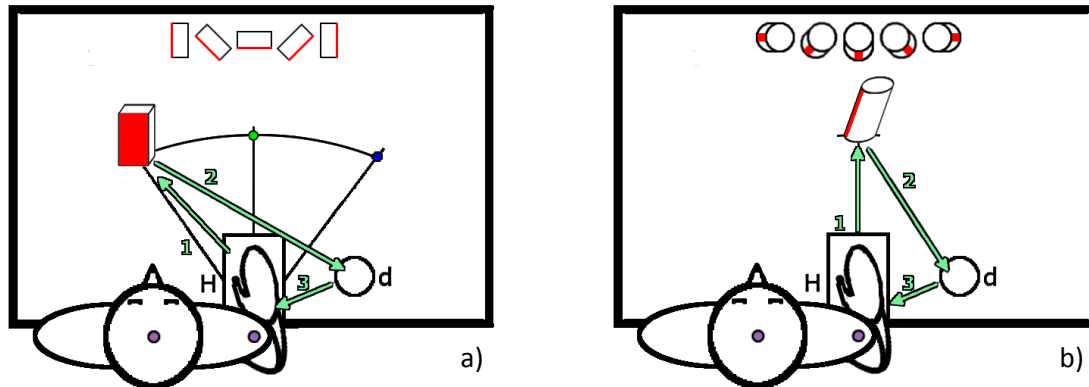


Figure IV-13. Modification de l'orientation de l'objet. a) Protocole de la tâche 2 : l'objet est placé sur l'un des trois points et suivant l'une des cinq orientations représentées en haut de la figure. Le sujet doit le saisir et l'amener au point d avec une orientation finale imposée. b) Protocole de la tâche 3 : idem que la tâche 2 mais avec un seul point de départ et le Cylindre Incliné.

Ici nous voulions étudier l'influence de l'orientation sur le positionnement des doigts et de la main par rapport à ce type d'objet, et aussi celle que peut avoir une consigne de manipulation basique (orientation finale imposée) par rapport à un mouvement libre comme ceux effectués dans la première expérience.

iii) Tâche 3 : Modification de l'orientation suivant un axe incliné

Ce dernier protocole voyait le sujet saisir et manipuler le cylindre incliné (ICyl) entre le point-cible central et le point **d**. A la différence du sous-ensemble précédent, la position de départ de l'objet était fixe ; seuls le type de prise et l'orientation initiale de l'objet étaient déterminés aléatoirement. Comme précédemment cette dernière était modulée suivant 5 possibilités et l'orientation finale était imposée au sujet.

Le but ici était de mesurer l'impact de l'inclinaison du cylindre ($\pm 20^\circ$) en plus de la variation de l'orientation sur la saisie par rapport à un objet « normal ». Ce protocole se divisait en deux parties : la première où le cylindre était positionné avec la bande de couleur contraignant le pouce vers l'« extérieur » (voir Figure IV-13, b), la seconde plaçant cette même bande vers l'intérieur (ce qui correspond au retournement horizontal de l'objet) ; nous avons donc pu observer l'influence des angles de 20° et -20° dans le plan sagittal du sujet.

4. Méthodes : nouvelles architectures de contrôle.

Nous avons ensuite défini trois nouvelles architectures d'unités d'appariement qui allaient recevoir les données expérimentales et apprendre les différentes sous parties du problème à résoudre. Ces structures devaient nous permettre d'évaluer la souplesse du système développé jusqu'à présent ainsi que sa fiabilité par rapport au ratio nombre d'unités/complexité des données à traiter. En effet, nous avons cette fois choisi d'utiliser des données non-différenciées entre les unités d'appariement, c'est-à-dire que toutes les unités, quelle que soit la sous-partie du problème qu'elles doivent résoudre, reçoivent en entrée le même vecteur de données. Celui-ci se compose de onze variables :

- Les trois coordonnées X, Y, et Z de l'objet dans le repère de la table (ramenées ensuite dans l'espace global), ainsi que ses trois orientations α , β et γ (idem)
- Ses dimensions suivant les trois directions de l'espace
- Son type, caractérisé par un scalaire suivant la correspondance suivante :
 - o 1 : parallélépipède,
 - o 2 : sphère,
 - o 3 : cylindre vertical
 - o 4 : cylindre horizontal
 - o 5 : cylindre incliné à 20°
 - o 6 : cylindre incliné à -20°
- Le type de saisie imposé, lui aussi symbolisé par un scalaire :
 - o 1 : par le dessus
 - o 2 : libre
 - o 3 : par le côté

A chaque utilisation de la simulation ce vecteur d'entrées à onze dimensions, entièrement paramétrable par l'utilisateur, est envoyé aux différentes unités d'appariement afin qu'elles résolvent le problème posé.

Une fois encore nous avons subdivisé ce problème en deux sous-systèmes, dédiés respectivement à l'Atteinte et à la Saisie.

a) Atteinte

Ce sous-système reprend majoritairement celui qui avait été mis en place dans la précédente architecture (Figure IV-14). Les seules différences tiennent à la suppression de l'unité 9 (qui mettait en rapport l'orientation locale de l'objet par rapport à la table et son orientation globale dans l'espace de travail) ainsi qu'au fait d'utiliser les mêmes informations en entrées de toutes les unités, comme expliqué ci-dessus.

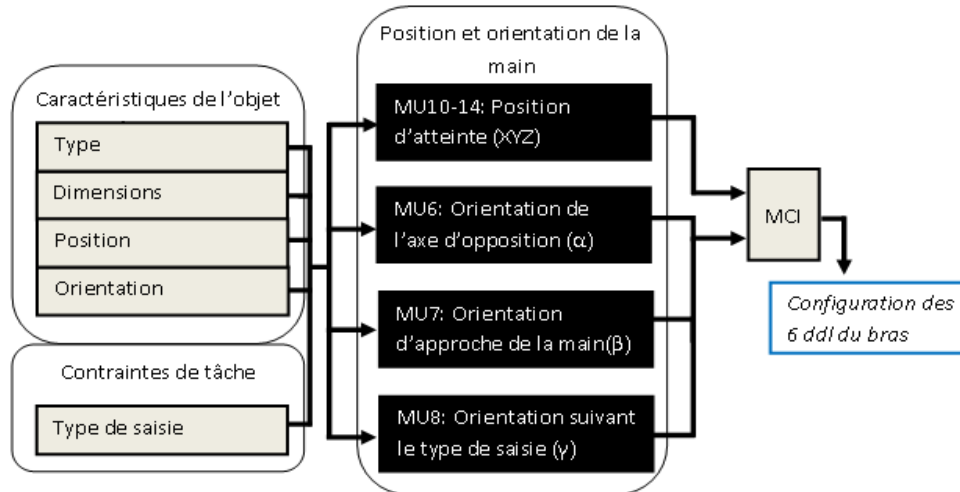
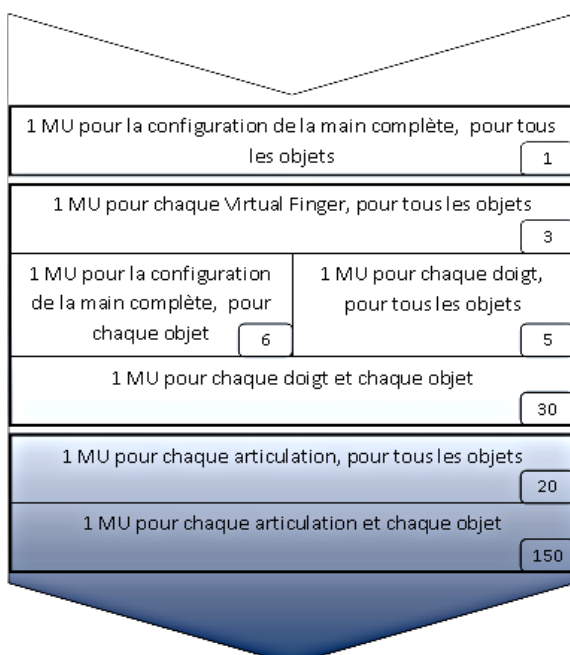


Figure IV-14. Sous-système dédié à l'Atteinte. La seule différence notable avec le sous-système présenté au chapitre III est que cette fois toutes les Mus travaillent sur le même vecteur d'entrée.

b) Saisie

Pour ce second sous-système nous avons voulu comparer trois approches représentant chacune un niveau de contrôle chez l'homme : l'un de haut niveau, les deux autres de niveau intermédiaire, l'architecture proposée dans le chapitre III étant plutôt de bas-niveau. Nous pouvons voir sur la Figure IV-15 que ces niveaux sont nombreux et vont déterminer autant de combinaisons de MUs.



Ainsi la main pourra être contrôlée de manière globale par une MU unique (comme notre premier système présenté ci-dessus) ou de plus en plus localement à mesure que l'on subdivise le problème.

L'intérêt d'un tel découpage réside non seulement dans la mise à l'épreuve de l'algorithme d'apprentissage employé mais surtout dans l'impact de ces différentes possibilités sur les configurations de prise générées.

Figure IV-15. Les différents niveaux de contrôle de la main sont autant de combinaisons de MUs.

La première architecture que nous avons choisi d'implémenter ne comporte qu'une seule et unique MU (Figure IV-16). Ceci représente le plus haut niveau qui pourrait être adopté par le SNC pour contrôler la main, à savoir la planification. La main devient alors un ensemble dont une seule population de neurone pourrait déterminer la configuration, les détails de la mise en place de celle-ci étant relégués aux niveaux inférieurs. On se trouve ici au niveau des *eigengrasps* (« configuration propres ») proposés par Ciocarlie et al (Ciocarlie, Goldfeder et Allen 2007) et situés encore au-dessus des composantes principales de Santello et Flanders (Santello et Flanders 1998) ou Ingram et al (Ingram, et al. 2008).

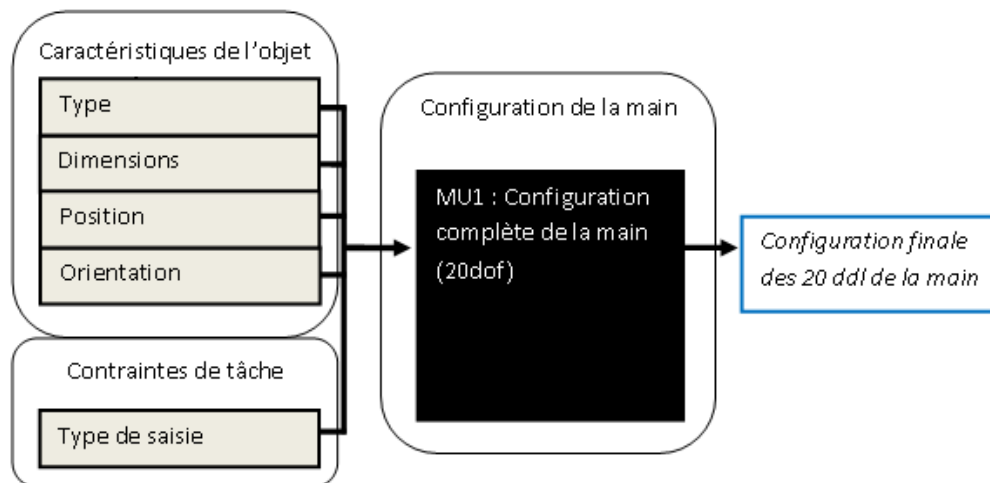


Figure IV-16. L'architecture « haut-niveau » proposée pour générer la configuration de la main n'est constituée que d'une MU ; elle considère la main comme un ensemble et fonctionne sur ses synergies.

La deuxième quant à elle se situe à un niveau intermédiaire, considérant chaque doigt comme étant pilotable par une MU (Figure IV-17). Chaque doigt va ainsi être pris comme une unité indépendante des autres et contrôlé comme tel, les synergies qui les lient étant implicites à la tâche. On se trouve ici au niveau de l'actionnement de précision, celui qui permet d'exécuter des tâches de manipulation fine ou demandant aux doigts un travail individuel (jouer du piano par exemple) ; on peut donc s'attendre à un résultat plus précis que pour la précédente proposition.

La dernière architecture proposée se situe elle aussi à un niveau intermédiaire, en ce qu'elle attribue à chaque type d'objet une MU qui va contrôler la main entière (voir Figure IV-18). On souhaite ainsi voir l'influence des différences géométriques des objets sur la configuration de la main. Ce niveau peut être mis en relation avec les populations de neurones qui permettent la discrimination des objets en fonction de leur concept.

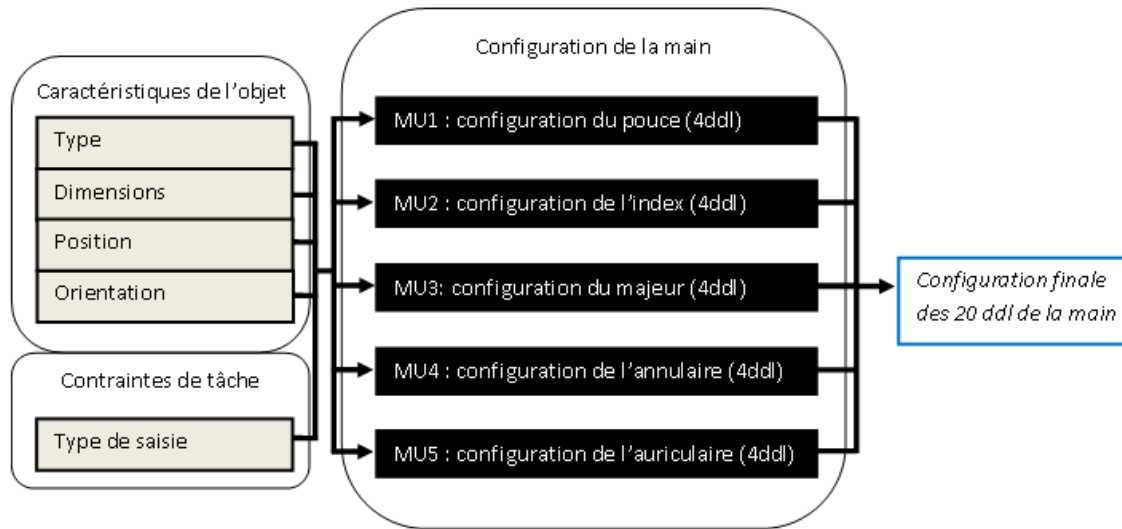
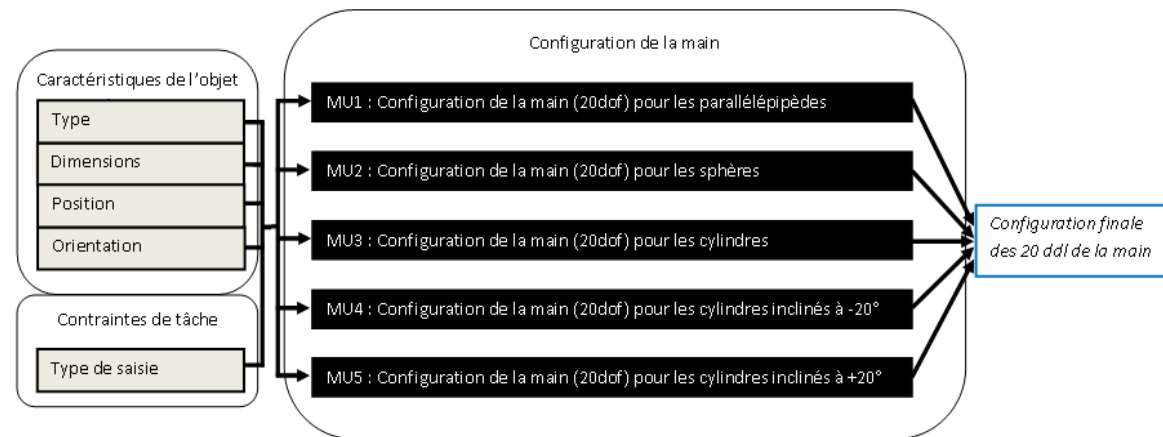


Figure IV-17. La première architecture de contrôle « intermédiaire » de notre système alloue une MU à chaque doigt. Les synergies internes à chaque chaîne cinématique seront gérées par les MUs tandis que celles qui les relient seront gérées de manière implicite par l'apprentissage.

Figure IV-18. La seconde architecture de contrôle « intermédiaire » de notre système représente un niveau de détail par rapport à celle présentée sur la Figure IV-16 en allouant une MU à chaque type d'objet.



5. Résultats

a) Constitution de la base

Afin d'extraire les 1596 points relatifs aux mouvements de chaque sujet, nous avons mis en place un étage de traitement automatique des données. Celui-ci calcule en premier lieu la vitesse instantanée de la main à partir des mesures du polhemus (Équation IV-5), après les avoir traitées avec un filtre passe-bas.

(Équation IV-5)
$$V_{inst} = \sqrt{\frac{dx^2}{dt} + \frac{dy^2}{dt} + \frac{dz^2}{dt}}$$

Les points d'inflexion de cette vitesse vont nous donner les instants où les sujets ont changé de trajectoire, et donc les moments où ils ont pris ou déposé les objets. En exploitant sur ce fait nous avons pu effectuer une segmentation automatique des données et la soumettre de manière graphique à un contrôle humain (Figure IV-19). Cette technique se montre particulièrement robuste dans ses estimations et peut absorber la plupart des perturbations.

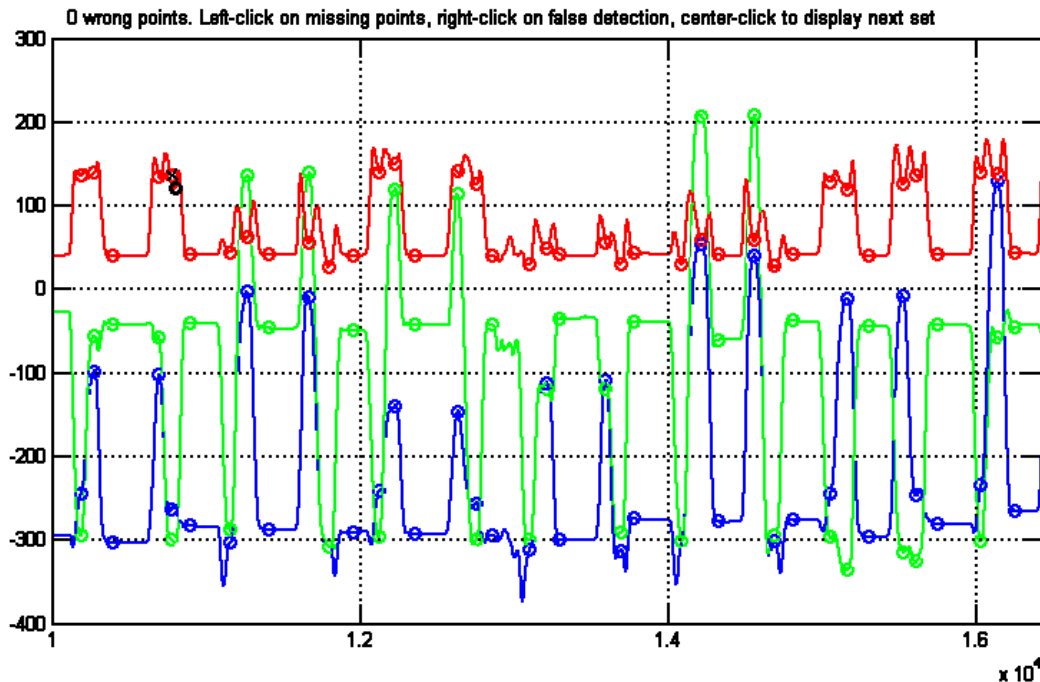


Figure IV-19. Le résultat de l'extraction automatique des points d'inflexion de la trajectoire est soumis à un contrôle manuel. Les trois composantes du mouvement sont affichées (X en bleu, Y en vert, Z en rouge) et marquées par les points détectés (cercles de couleur). L'opérateur peut ensuite supprimer un point et en ajouter un à l'aide de la souris (signifié par une croix et un cercle noirs, respectivement). Les points sont comptabilisés et affichés par séquences de 3000 échantillons, et une validation est demandée en fin de traitement.

Chaque mouvement de prise-dépose est ainsi caractérisé par trois points : un de prise, un de dépose, un retour au point H. Une fois toutes les positions validées par l'utilisateur ces derniers sont retirés afin de ne conserver que les mesures. Les indices des points conservés sont ensuite utilisés pour extraire les configurations complètes de la main des fichiers de mesure générés par le système d'acquisition et les stocker dans des matrices utilisables pour l'analyse des mouvements.

b) Analyse de l'Atteinte

En partant du principe que chaque tâche abordait le problème d'Atteinte sous un angle et des influences différentes (déplacement des cibles, orientation) nous avons choisi de les traiter isolément. Après une première estimation des données nous avons écarté de l'étude deux des douze sujets, les trop nombreuses erreurs réalisées par ceux-ci durant les tâches ayant un impact par trop importante.

Dans la suite de cet exposé nous utiliserons la convention suivante (voir Figure IV-20) : l'axe X prolonge l'axe principal de la main (de la paume vers le majeur), l'axe Y suit la paume de manière transversale (de la paume vers l'auriculaire), l'axe Z sort du côté palmaire ; l'azimuth est exprimé autour du Z_{world} tandis que l'élévation et le roulis sont embarquées sur les axes Y_{main} et X_{main} , respectivement.

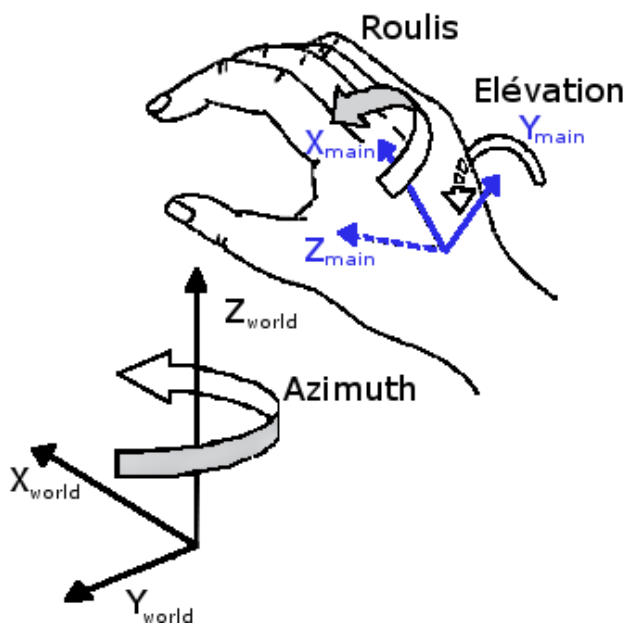


Figure IV-20. Convention utilisée pour l'étude de l'Atteinte. Les flèches montrent le sens de rotation positif. Adapté de (Bensmail, et al. 2010)

i) Tâche 1 : Exploration du domaine de travail

Nous rappelons ici que cette tâche utilisait trois types d'objets (parallélépipède, cylindre vertical, sphère) chacun décliné en deux jeux de dimensions (voir Tableau IV-14), saisis par le haut ou le côté et placés sur neuf points-cibles différents. La première étape était donc d'examiner l'influence des six objets et des deux stratégies de prise sur les six composantes du positionnement de la main. Pour ce faire nous avons réalisé une ANOVA à deux facteurs (objets, stratégies) sur les mesures et les avons regroupées par sessions de mesure (une session par objet, voir Figure IV-21).

Les résultats montrent que tous les paramètres sont influencés à la fois par les différents objets (donc leur géométrie) ainsi que la stratégie de prise adoptée ($p < 0,0001$). Mis à part pour l'azimuth on constate que la déviation standard est très faible autour des valeurs moyennes.

L'azimuth de la main est globalement dirigé vers la droite, ce qui est logique si l'on considère que tous les sujets étaient droitiers et que leur main s'est orientée de manière à placer le pouce en position de confort ; cette observation est encore plus flagrante pour les saisies par le côté que celle par le dessus. L'élévation quant à elle est plus marquée lorsque l'instruction était de saisir par le dessus ; enfin le roulis reflète les stratégies adoptées lors de la saisie des objets, avec une valeur quasi constante pour la prise du dessus.

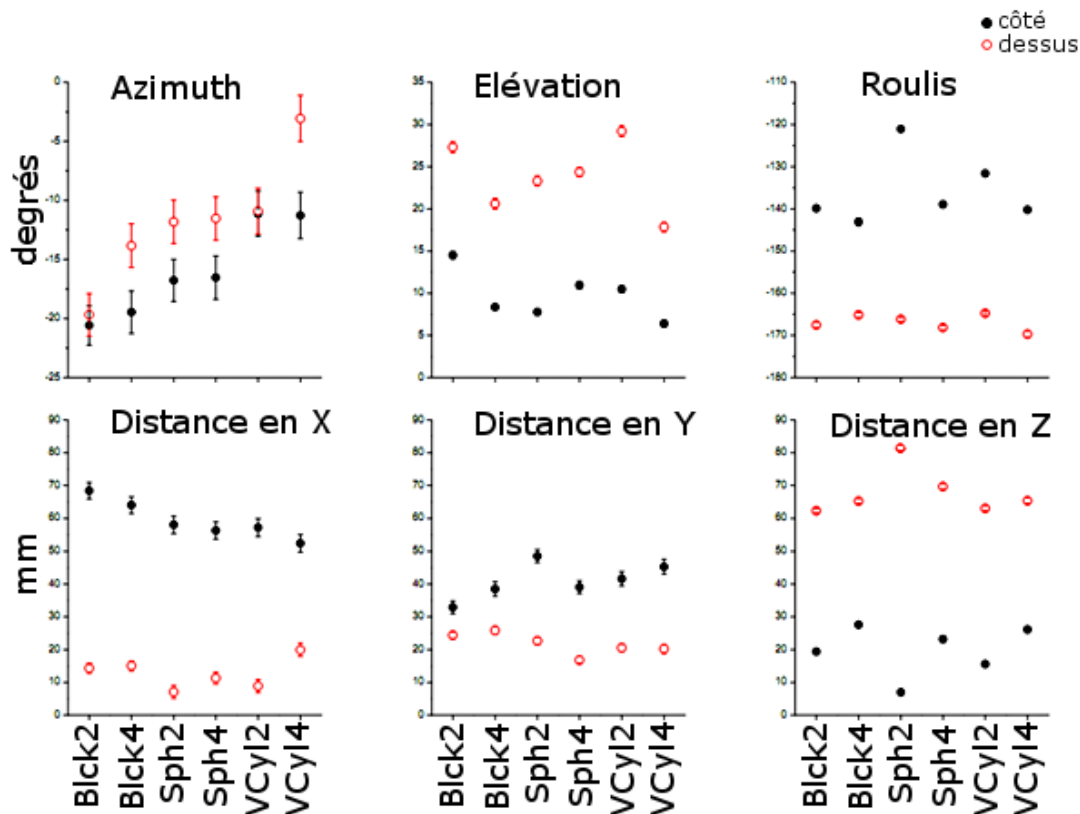


Figure IV-21. L'évolution de chaque composante du positionnement de la main (en ordonnées) en fonction des différents objets manipulés (en abscisses). Chaque point représente la valeur moyenne obtenue pour cette session ainsi que sa déviation standard ; les points rouges sont pour les prises du dessus, les noirs pour les prises de côté. Adapté de (Touvet, et al. 2013).

La position relative de la main par rapport à l'objet dans le repère World est elle aussi un reflet direct de la stratégie de prise. Ceci mis à part on observe néanmoins un placement de la main à une distance quasi constante en X et Y et ce pour les deux stratégies (approximativement 15 mm suivant X et 25 mm suivant Y pour la prise du dessus ; $52,4 \pm 2,7$ à $68,4 \pm 2,5$ mm suivant X et $32,9 \pm 1,9$ à $52,4 \pm 2,7$ mm suivant Y pour la prise de côté).

Nous avons ensuite regroupés les différentes composantes en deux sous-groupes de trois dimensions chacun, l'un représentant le placement de la main dans le plan (position en X et Y, azimuth), l'autre sa configuration d'approche de l'objet (position suivant Z, roulis et élévation). Nous avons pu ainsi observer l'influence du point-cible utilisé sur ces deux groupes de paramètres, ce que montrent la Figure IV-22 et la Figure IV-23.

Les positionnements moyens de la main dans le plan nous montrent que les différents paramètres qui le composent sont très influencés par la position de l'objet ; l'offset entre la position de la main et celle de l'objet est quasiment constant, ainsi que l'orientation de celle-ci par rapport à la direction du point-cible. De plus, nous confirmons ici que les points de dépose (moment où l'objet était posé) sont effectivement très proches des points de prises (moment où il était saisi), que ce soit en termes de translation ou d'orientation. Cette invariance est d'autant plus étonnante qu'aucune consigne n'a été fournie en ce sens aux sujets ; ils ont adopté un comportement répétable de leur fait seul.

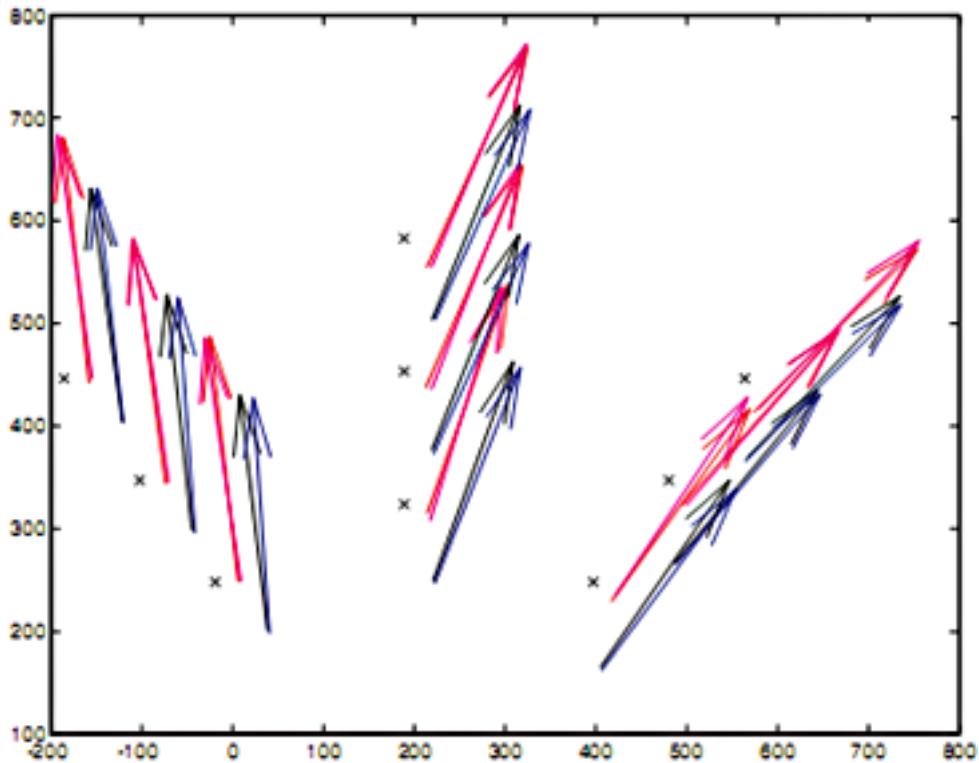


Figure IV-22. Le positionnement moyen de la main dans le plan (XY) en fonction des points-cibles pour le petit parallélépipède (Blck2). Les flèches sont unitaires et suivent le code couleur suivant : rouge pour les points de prise par le dessus, rose pour les points de dépose par le dessus (retour) ; noir pour les points de prise par le côté, bleu pour les points de dépose par le côté (retour). Leur point d'origine marque la position de la main, leur direction son azimuth. Adapté de (Touvet, et al. 2013)..

Pour ce qui est de l'autre sous-groupe de paramètres, on peut constater que la hauteur et l'élévation sont influencées par la position de l'objet, suivant le rayonnement autour de l'épaule seul pour la première (lignes INT, MED, EXT) et suivant le rayonnement et la distance à l'épaule pour la seconde (colonnes Far, Med, Close). Le roulis quant à lui ne présente pas de nuance par rapport aux résultats présentés en Figure IV-21.

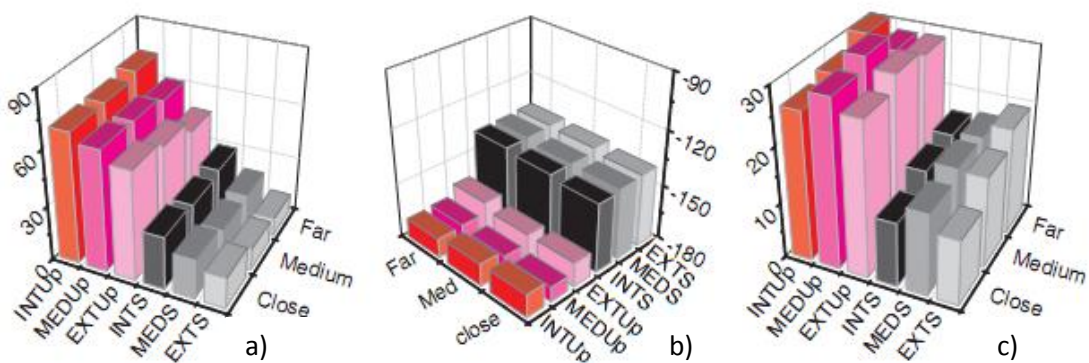


Figure IV-23. Valeurs moyennes des paramètres d'approche de la main en fonction de la position de l'objet Blck4 : a) hauteur relative, b) roulis, c) élévation. INT = points situés sur la ligne rouge, MED = points situés sur la ligne verte, EXT = points situés sur la ligne bleue ; Up = saisie par le dessus, S = saisie par le côté ; Far = point « lointain », Med = point « moyen », close = point « proche ». Adapté de (Touvet, et al. 2013).

Nous avons enfin réalisé une Analyse en Composante Principales sur l'ensemble de la base de données des sujets afin de voir quels paramètres pouvaient être corrélés et dans quelle mesure. Les deux premières composantes principales se trouvent représenter respectivement 48,7% et 30,9% de la variabilité des données (soit au total 79,6%), et réunissent les corrélations suivantes :

- PC1 = hauteur (0,939) + élévation (0,761) – roulis (0,903) + position suivant X (0,687)
- PC2 = azimuth (0,910) – position suivant Y (0,793) + position suivant X (0,510)

Si l'on exclue la position suivant X puisqu'elle intervient dans les deux facteurs, on peut voir que les six composantes sont clairement représentées par les axes dessinés par ces composantes principales. En exprimant nos critères de départ (stratégies de saisie, objets, positions des points-cibles) dans le plan qu'elles définissent, nous pouvons constater qu'elles sont aussi fortement corrélées avec le type de saisie (par le dessus ou le côté) et la position des objets sur les points-cibles, en particulier le rayonnement autour de l'épaule (voir Figure IV-24 , a et c) ; par contre elles ne permettent absolument pas de discriminer les différents objets (Figure IV-24, b).

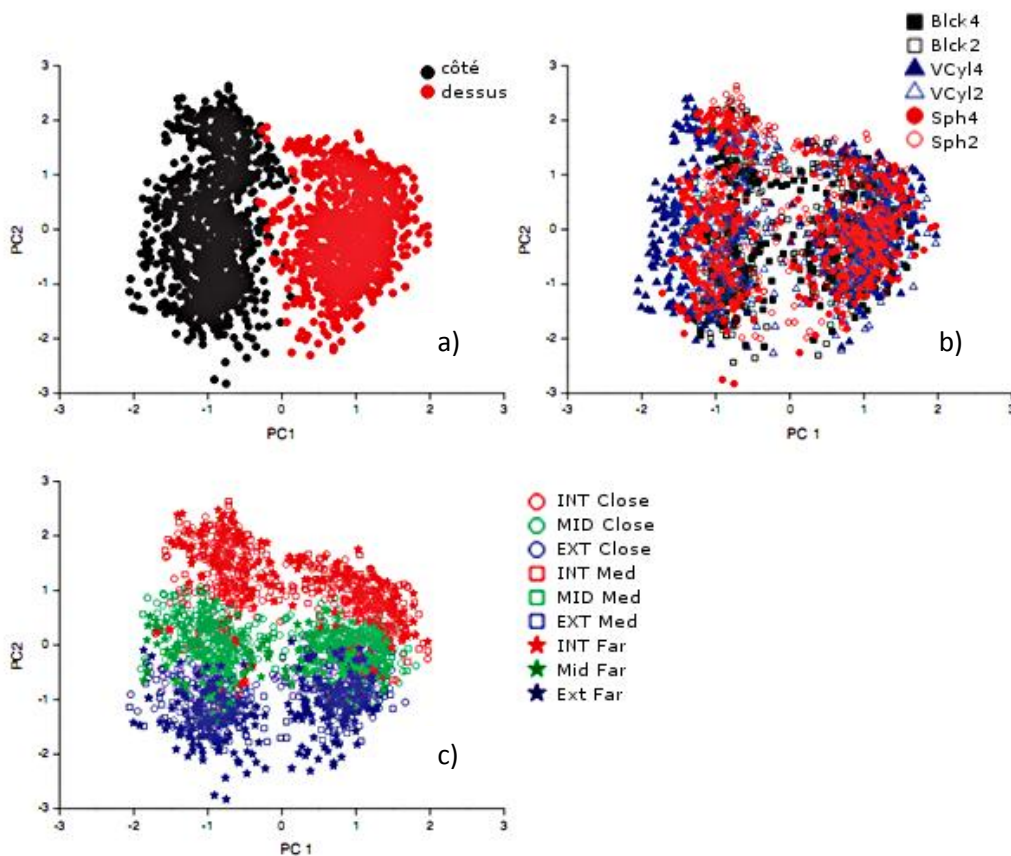


Figure IV-24. Représentation des différents critères d'influence dans le plan des deux premières composantes principales : a) les stratégies de prise, b) les différents objets, c) leur position sur les points-cible. Adapté de (Touvet, et al. 2013)..

ii) Tâche 2 : Modification de l'orientation suivant un axe

De même que pour la tâche 1 nous avons examiné l'effet de la position et de l'orientation de l'objet sur les six composantes spatiales du placement de la main (Figure IV-25). Cette fois-ci on constate qu'à part l'azimuth tous les paramètres sont largement influencés par la tâche ; la position de l'objet quant à elle impacte de manière significative l'élévation et les trois composantes de translation ; enfin l'orientation de l'objet montre une influence très forte sur la configuration de la main dans le plan (composantes X et Y, et azimuth), particulièrement pour la prise par le côté. Pour les autres composantes son influence est partielle : l'élévation et le roulis y sont sensibles lors des prises du dessus, et la distance suivant Z ne change que peu.

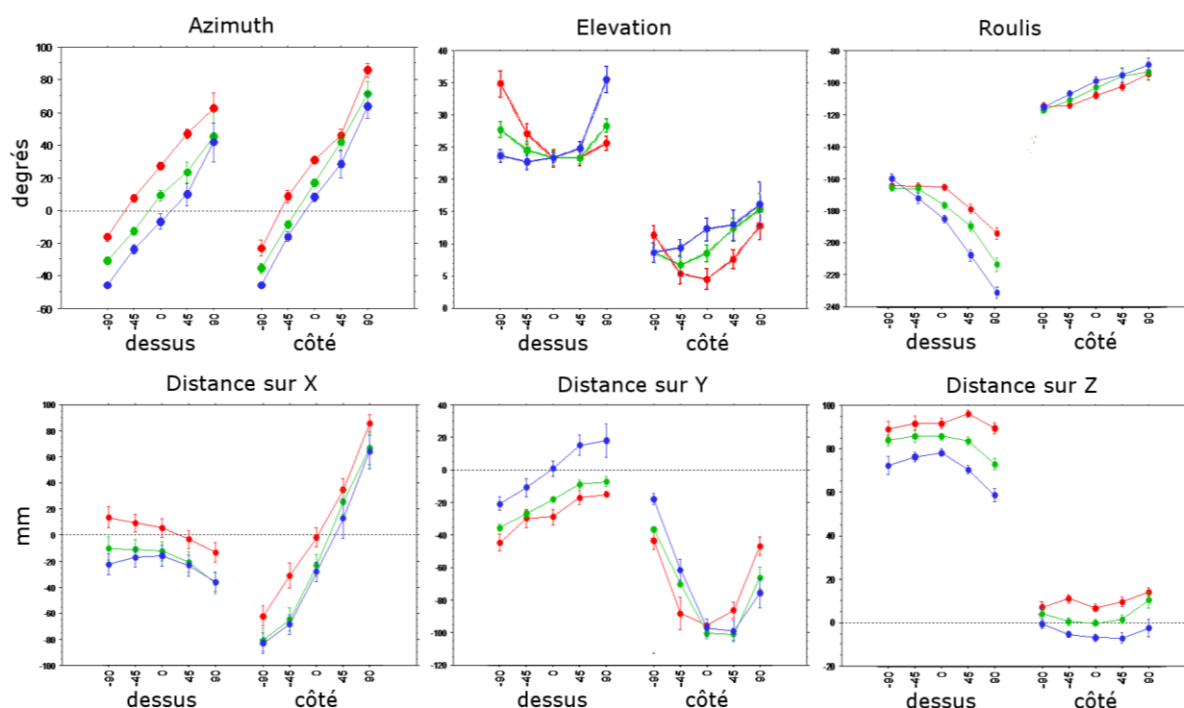


Figure IV-25. Evolution de chaque composante du positionnement de la main (en ordonnées) en fonction des types de prise et des différentes orientations de l'objet sur les trois points-cible (en abscisses). Chaque point représente la valeur moyenne obtenue pour cette session ainsi que sa déviation standard ; les points rouges correspondent à la première position à gauche, les verts à la position centrale, les bleus à la position située à droite. Adapté de (Touvet, et al. 2013)..

En conséquence nous avons voulu détailler de manière plus précise l'influence des différents facteurs sur la position de la main dans le plan (Figure IV-26). Cette seconde analyse nous confirme que de manière similaire aux résultats de la tâche 1 la main est très corrélée dans le plan avec la position de l'objet, d'autant plus lorsqu'on en fait varier l'orientation. Il est intéressant aussi de voir la dispersion relativement faible de la paume lors des prises du dessus, ainsi que l'influence de la position de l'objet sur l'azimuth de la main pour les prises par le côté : plus l'objet est situé à droite du sujet, plus l'angle de la main par rapport à l'objet est ouvert ; en ce cas la saisie ne peut être effective que par une implication plus grande des doigts.

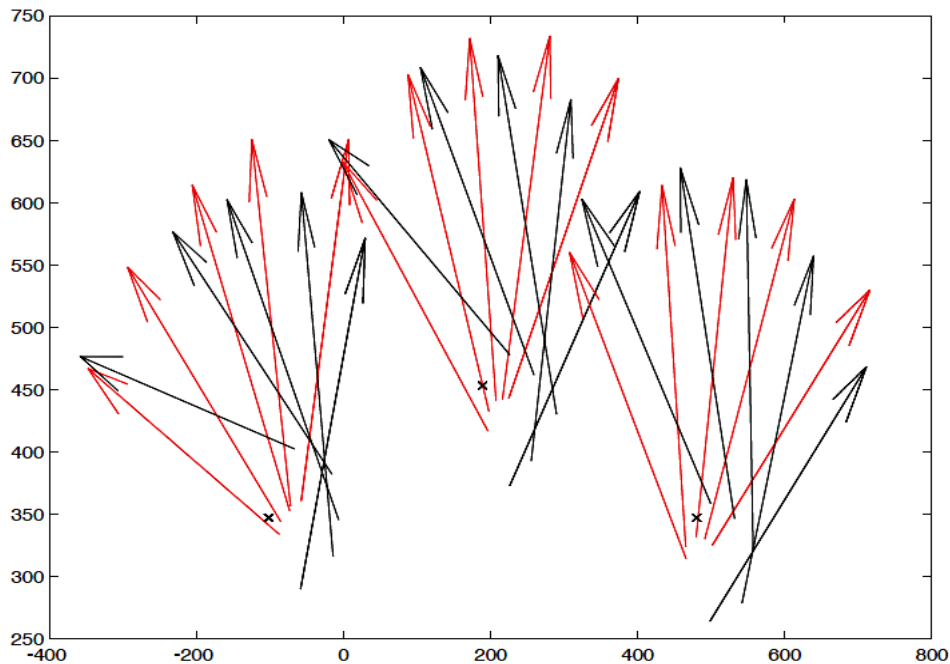


Figure IV-26. Le positionnement moyen de la main dans le plan (XY) en fonction des points-cibles pour l'objet Blck5. Les flèches sont unitaires et suivent le même code couleur que précédemment ; ici seuls les points de prises ont été mesurés. Le point d'origine des flèches marque la position de la main, leur direction son azimuth. Adapté de (Touvet, et al. 2013)..

Il est important de noter que dans cette tâche les données étaient « bruitées par la contrainte », à savoir que les sujets n'ont pas tous adopté les mêmes stratégies pour satisfaire les consignes qui leur étaient données. Ceci est illustré par les données du Tableau IV-15, où l'on a répertorié le nombre de fois où une saisie « déviante » était adoptée par les sujets (voir section 4.d pour une explication des comportements de sujets lors de l'étude). Ces données ont été écartées de l'étude statistique.

On peut constater néanmoins que la moitié des sujets est concernée (5 sujets sur 10), et que leur contribution à ce phénomène est très variable, certains changeant même de stratégie en cours d'expérience. On peut cependant conclure que le nombre de fois où une stratégie alternative a été adopté augmente proportionnellement à la contrainte.

Tableau IV-15. Nombre de saisies « déviantes » en fonction de l'angle de l'objet au moment de la saisie.

Angle (en °)	Sujet n°2	Sujet n°5	Sujet n°6	Sujet n°7	Sujet n°9	Total
0	0	3	0	0	0	3
45	1	6	1	4	2	14
90	5	8	3	7	7	30

De par le plus faible nombre de mesures et de variable, la réalisation d'une analyse en composantes principales ne nous a pas semblée judicieuse.

iii) **Tâche 3 : Modification de l'orientation suivant un axe incliné**

Les données de cette tâche se sont révélées encore plus bruitées que dans la précédente, et les différentes équivalences motrices adoptées par les sujets ont rendu leur analyse statistique inutile. Nous ne les présenterons pas ici, mais des éléments d'analyse en sont donnés dans la section 4.d, 2.

c) Analyse de la Saisie

Les données relatives à la saisie ont été extraites de la même façon que celles concernant l'atteinte ; un vecteur de 20 paramètres angulaires a ainsi été constitué afin de contrôler notre modèle de main, suivant le formalisme suivant :

- Pouce : roulis, abduction palmaire, flexion MC, flexion IPD
- Index puis les trois autres doigts longs : flexion MCP, abduction/adduction, flexion IPP, flexion IPD

Tous les angles mesurés ont été appliqués directement au DDL qui leur correspond, à l'exception des angles d'écartement des doigts. Ceux-ci n'étant mesurés que de manière relative (l'écartement peut être du tant au mouvement d'un doigt par rapport à l'autre que l'inverse) nous avons établi un formalisme basé sur les règles biomécaniques de la main afin de pouvoir les utiliser (Kapandji 2007) :

- La mesure entre le pouce et l'index est attribuée à l'abduction palmaire
- La mesure entre l'index et le majeur est attribuée à l'abduction de l'index
- Le majeur reste fixe (abduction/adduction = 0°)
- La mesure entre le majeur et l'annulaire est attribuée à l'abduction de l'annulaire
- La mesure entre l'annulaire et l'auriculaire est ajoutée à celle de l'annulaire et attribuée à l'abduction de l'auriculaire

Un examen attentif des configurations du pouce nous a montré que sa reconstruction posait problème. Ceci est un phénomène assez connu par les utilisateurs de gants Cyberglove, et plusieurs techniques pour y remédier ont déjà été proposées (se référer à Turner 2001 pour un aperçu de ces techniques). Nous avons pour notre part choisi la simplicité en intégrant un étage d'optimisation sous contrainte (voir chapitre V, section 2, d ,4 pour une explication détaillée d'une telle technique) en nous limitant cependant aux deux premiers DDL (roulis et abduction palmaire). La contrainte à minimiser était la largeur de l'objet, correspondant à l'axe de saisie de la main (voir Figure IV-27). Le reste des données n'a pas présenté de problème particulier, nous avons pu les utiliser directement (voir Figure IV-29)

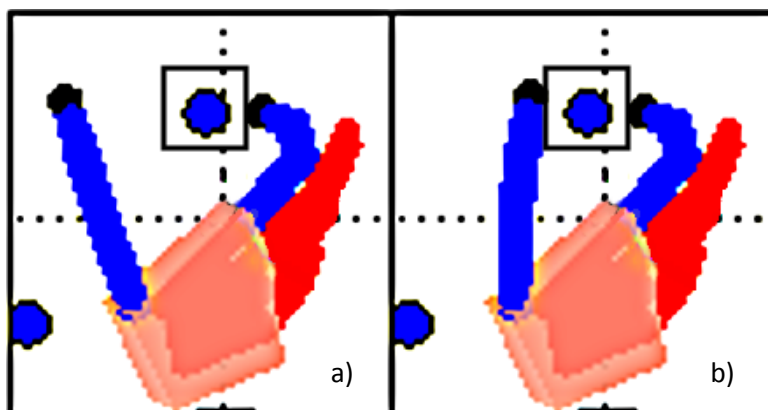


Figure IV-27. Illustration de l'optimisation sous contrainte appliquée au deux premiers DDL du pouce : a) configuration de saisie originale ; b) configuration de saisie optimisée. Les points bleus représentent les différents points-cibles ; l'objet à saisir (Blck2) est matérialisé par un rectangle noir ; le pouce et l'index sont indiqués en bleu, le reste des doigts en rouge.

En exprimant la variation des angles articulaires des doigts en fonction de la tâche, de l'objet et du type de prise nous avons constaté que les configurations de saisie mises en place par les sujets présentaient peu de variabilité inter-individus (voir Figure IV-28). Nous pouvons en déduire que ces paramètres, couplés avec les contraintes biomécaniques de la main, prévalent largement sur l'expérience personnelle quant à la solution à mettre en place pour saisir un objet dans le contexte de notre expérience.

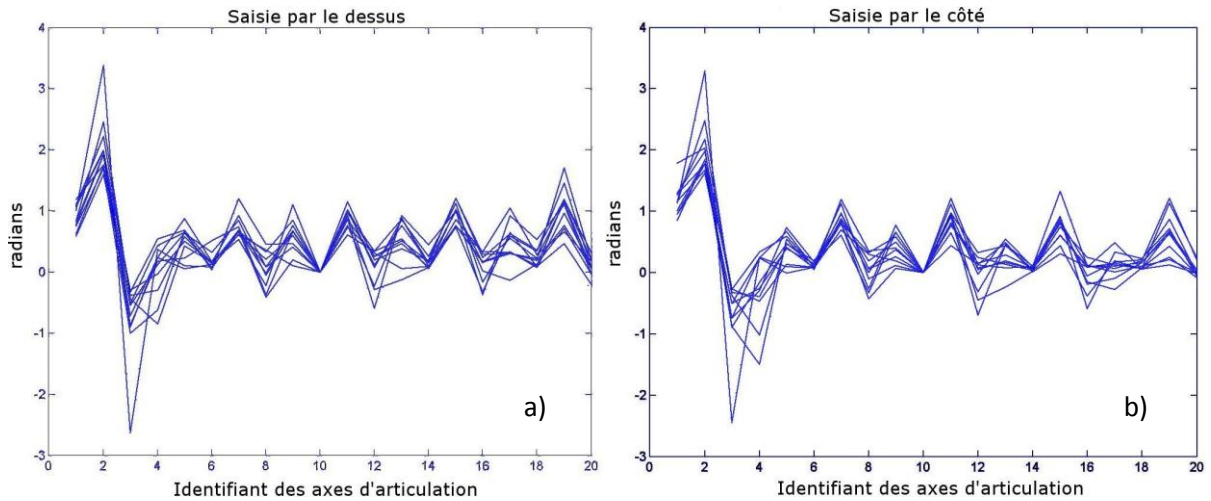


Figure IV-28. Exemples de la cohérence des valeurs moyennes des angles pour chaque sujet, mesurées lors de la tâche 1 appliquée aux cylindres verticaux. a) Prise par le dessus ; b) Prise par le côté. Les autres mesures ont montré le même type de profil.

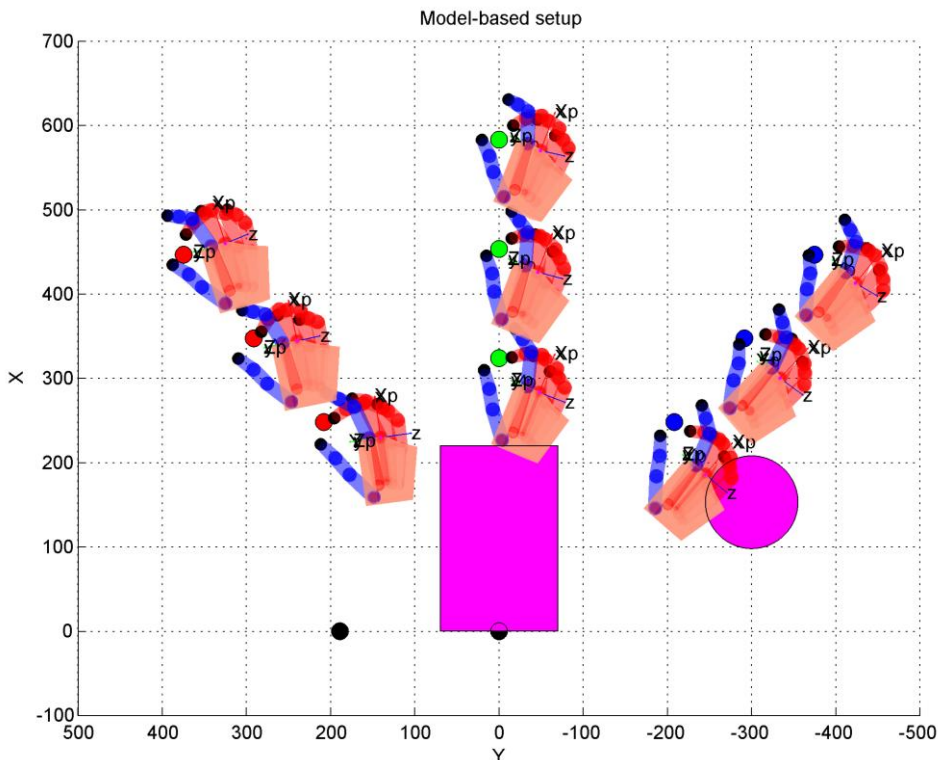


Figure IV-29. Exemple de configurations de saisie mesurées, vues du dessus : positions moyenne d'un des sujets pour l'objet Sph2 pris par le côté. On observera que l'axe de saisie est entre le pouce et le majeur.

Approche bioinspirée pour le contrôle des mains mécaniques

F. Touvet

L'analyse en composantes principales a cette fois été réalisée dans des sous-espaces liés au type de prise et d'objet ; en effet nous ne cherchions pas ici à caractériser les configurations de saisie comme on peut le trouver dans la littérature (Santello et Flanders 1998, Ingram, et al. 2008) mais à voir la représentativité inter-sujets et inter-objets de ces composantes (voir Tableau IV-16, Tableau IV-17, Tableau IV-18).

L'analyse de ces données nous indique que mis à part le sujet n°9 le nombre de composantes entrant dans les 95% de variance est assez stable (autour de 7), et ce quel que soit le type d'objet et la stratégie de prise considérés. La contribution de ces composantes est par contre beaucoup plus diversifiée ; on notera cependant sa cohérence en fonction des différents types d'objets saisis.

Tableau IV-16. Nombre et contribution des composantes principales entrant dans la représentativité à 95% des données des sujets pour les **parallélépipèdes**. Seules les deux premières CPs sont reportées.

ID Sujet	Dessus			Côté		
	nb CPs	CP1	CP2	nb CPs	CP1	CP2
1	5	61	18	6	73	8
2	6	46	25	7	28	27
3	6	48	27	8	34	26
4	6	41	34	7	48	20
5	8	42	20	6	68	11
6	6	47	32	5	76	7
7	7	64	16	8	52	12
8	7	59	14	7	62	12
9	10	33	21	9	35	22
10	6	55	22	6	39	29
Moyenne	6,7	49,6	22,9	6,9	51,5	17,4
Ecart	1,04	8,12	5,28	0,92	14,7	7,4

Tableau IV-17. Nombre et contribution des composantes principales entrant dans la représentativité à 95% des données des sujets pour les **sphères**. Seules les deux premières CPs sont reportées

ID Sujet	Dessus			Côté		
	nb CPs	CP1	CP2	nb CPs	CP1	CP2
1	5	63	16	6	55	20
2	6	65	12	7	50	18
3	4	69	14	7	62	12
4	5	63	17	5	63	16
5	8	48	20	7	59	20
6	5	60	20	5	70	10
7	6	51	23	7	48	16
8	7	55	18	7	68	12
9	8	35	32	9	46	18
10	5	72	9	6	75	10
Moyenne	5,9	58,1	18,1	6,6	59,6	15,2
Ecart	1,1	8,68	4,52	0,88	8	3,36

Tableau IV-18. Nombre et contribution des composantes principales entrant dans la représentativité à 95% des données des sujets pour les **cylindres verticaux**. Seules les deux premières CPs sont reportées

ID Sujet	Dessus			Côté		
	nb CPs	CP1	CP2	nb CPs	CP1	CP2
1	7	52	19	8	49	25
2	6	48	30	7	35	29
3	8	42	20	8	44	20
4	5	56	25	6	48	33
5	8	60	9	8	50	15
6	6	45	31	6	47	28
7	8	41	25	9	35	25
8	9	42	30	10	50	15
9	9	35	27	10	41	20
10	6	57	20	7	50	16
Moyenne	7,2	47,8	23,6	7,9	44,9	22,6
Ecart	1,2	6,8	5,28	1,12	4,92	5,4

Une fois les mesures effectuées et vérifiées nous avons pu lancer leur apprentissage par nos trois structures de contrôle. Nous avons réalisé ces apprentissages au niveau individuel afin de reproduire le comportement de nos sujets.

D'un point de vue global les trois structures ont présenté de bons résultats en terme de configurations de prises (comprendre : les solutions qu'elles génèrent sont proches de celles ayant servi de base d'apprentissage) mais pas en terme d'approche de l'objet. En effet le positionnement de la main aux alentours de l'objet n'est efficace que pour une partie de l'espace de travail, et le fait que cette proportion varie entre les différents sujets porte à croire que ce problème est du à une erreur dans notre modèle de bras « générique ».

De manière inattendue les trois distributions de MUs ont donné des résultats très proches : l'écart maximal entre les différentes consignes est de l'ordre de 3° et concerne les flexions MCP du majeur et de l'annulaire (voir Tableau IV-19). Ce résultat vient néanmoins confirmer la souplesse de l'algorithme utilisé, qui a su converger vers une solution unique à partir de bases d'apprentissage différentes.

Tableau IV-19. Moyenne (et écart à la moyenne) des valeurs angulaires données par les différentes architectures d'un sujet, pour les trois plus grands objets. La variation la plus forte est indiquée en rouge.

	Pouce		Index		Majeur		Annulaire		Auriculaire	
	Moy.	écart	Moy.	écart	Moy.	écart	Moy.	écart	Moy.	écart
Blck4	78,08	1,61	15,95	1,28	6,30	2,85	5,17	2,74	7,91	2,50
	51,83	0,47	6,73	0,04	0,00	0,00	6,91	0,25	15,02	0,17
	-3,00	0,24	61,01	0,35	73,19	0,16	71,27	0,26	60,49	0,96
	19,77	0,73	20,04	0,57	30,56	0,74	26,97	0,25	21,36	1,15
Sph4	95,79	0,31	13,87	0,22	22,18	0,87	18,93	0,68	24,29	0,34
	48,13	0,78	6,41	0,05	0,00	0,00	10,61	0,09	19,27	0,25
	-2,20	0,03	50,34	0,38	64,78	0,18	75,74	0,06	74,80	0,20
	-7,08	0,42	4,82	0,03	13,93	0,10	16,05	0,04	15,10	0,13
Cyl4	101,61	0,79	34,33	0,47	37,85	0,65	32,39	0,81	51,17	1,62
	48,21	0,26	6,48	0,08	4,32	0,00	10,10	0,25	20,31	0,27
	-2,22	0,05	36,65	0,16	36,65	0,23	66,95	0,80	54,30	0,92
	-5,42	0,27	5,78	0,22	5,78	0,11	13,12	0,51	10,23	0,24

d) Données comportementales

Les résultats présentés ici sont issus de notes prises par l'expérimentateur pendant le déroulement de l'expérience mais aussi des réponses des sujets à un questionnaire qui leur a été fourni après leur participation (voir Annexe 4). Elles ne constituent pas le cœur de l'étude mais présentent cependant un intérêt certain si on les place dans la perspective d'autres études similaires, notamment celles utilisées dans le chapitre III.

i) Orientation non imposée : trois schémas sont apparus

Lors de la condition expérimentale n°1, où l'orientation de l'objet lors de la dépose sur les différents points-cible n'était pas imposée au sujet, sont apparus deux comportements principaux : l'orientation relative de l'objet par rapport au mouvement réalisé, directement liée aux positions des points de prise et dépose, mais aussi la tendance à orienter l'objet suivant la normale des lignes formés par les points-cible d'une même couleur.

Le premier comportement a fait l'objet de plusieurs études menées par Roby-Brami et Paulignan (Paulignan, Frak, et al. 1997, Roby-Brami 2000) qui bien que partant de postulats différents sont arrivées à une conclusion commune : lors de la saisie et du transport d'objets l'orientation de la pince entre les deux premiers VF est liée à celle de l'avant-bras de manière synergique, ce qui réduit drastiquement le travail du poignet. Dans une tâche de prise-dépose comme la nôtre on peut ainsi déterminer l'orientation finale de l'objet au moment de la dépose comme étant directement liée à son orientation initiale au point de prise et à l'angle reliant les deux points par rapport au centre mécanique du bras (centre de l'épaule), comme indiqué sur la Figure IV-30. Bien sûr le poignet ainsi que les doigts peuvent bouger et modifier cette orientation, mais dans la plupart des cas (s'il n'y a ni consigne ni contrainte particulière) ces modifications seront très faibles.

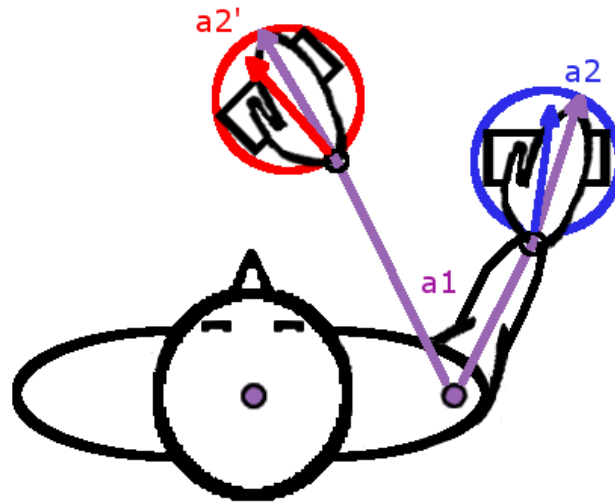


Figure IV-30. L'orientation finale $a2'$ de l'objet au moment de sa dépose va dépendre de son orientation initiale $a2$ par rapport à la main et de l'angle $a1$ qui sépare le point de prise (en bleu) et le point de dépose (en rouge) par rapport à l'épaule.

Le second comportement dénote une prépondérance des informations visuelles sur celles proprioceptives. En effet, si dans le premier cas c'était principalement les relations biomécaniques du bras et la gestion qui en est faite par le corps qui maintenaient l'orientation de l'objet constant par rapport à la main, ici ces relations sont asservies par le système visuel : le sujet, consciemment ou non, va voir que les cibles sont alignées par rapport à son épaule, va déterminer les droites qui en partent et va faire en sorte d'orienter l'objet perpendiculairement à ces droites. Ce comportement a été mesuré chez au moins un quart des sujets, même si la plupart du temps il a été remplacé en cours d'expérience par celui que nous venons de voir.

Le dernier enfin est assez curieux et anecdotique : pendant toute la tâche n°1 et malgré les contraintes parfois assez fortes que cela imposait, un des sujets s'est évertué à déposer les objets suivant une orientation nulle, c'est-à-dire suivant le plan frontal. Interrogé après la fin de l'expérience il a assuré que c'était pour lui la solution la plus naturelle et la moins contraignante.

ii) Réaction à une contrainte forte : trois stratégies ont émergé.

Lors de la réalisation des tâches 2 et 3 certaines configurations obligeaient les sujets à adopter une stratégie inhabituelle pour satisfaire les contraintes de placement du pouce et d'orientation finale de l'objet. La mise en place de ces stratégies était variable en fonction du sujet mais tous l'ont adoptée lorsque l'objet était orienté à -90° par l'expérimentateur.

La « stratégie 0 » consistait à adopter la même approche de l'objet que pour les autres configurations, à savoir faire le tour de l'objet par la droite et casser le poignet pour ramener les doigts vers le torse de l'individu. De par la position des objets (sur la ligne moyenne, soit à 70% du rayon de la zone de travail) ce comportement forçait les sujets à utiliser le tronc pour pouvoir réaliser la tâche, déplaçant ainsi la référence mécanique pour réduire la distance à parcourir par le bras et réduisant les contraintes biomécaniques au niveau du poignet et du coude. Ensuite, le sujet déroulait le bras vers la droite afin de placer l'objet au point **d** selon l'orientation imposée.

Les deux autres stratégies (1 et 2) débutaient par un retournement de la main via une pronation de 180° afin d'amener le pouce sur la face colorée. Ensuite les sujets suivant la stratégie n°1 maintenaient cette position et fléchissaient le poignet pour amener l'objet au point **d** suivant l'orientation imposée, tandis que ceux partisans de la stratégie n°2 effectuaient un mouvement de supination pour le retourner à la manière d'un sablier.

6. Discussion

Malgré des résultats encore incomplets nous pouvons déjà tirer de cette étude quelques conclusions fortes concernant les hypothèses que nous souhaitions aborder grâce à elle.

a) Les points de dépose comme équivalents aux points de prise

L'utilisation des points de dépose comme mesures valides était une hypothèse dont nous souhaitions examiner la validité. Les résultats des différentes expérimentations nous ont montré qu'elle était acceptable, ce que nous pouvons confirmer en observant la projection des deux groupes de points dans l'espace des composantes principales en fonction des points-cibles (Figure IV-31) : la différence entre les points de prise et de dépose est négligeable, particulièrement suivant la PC1.

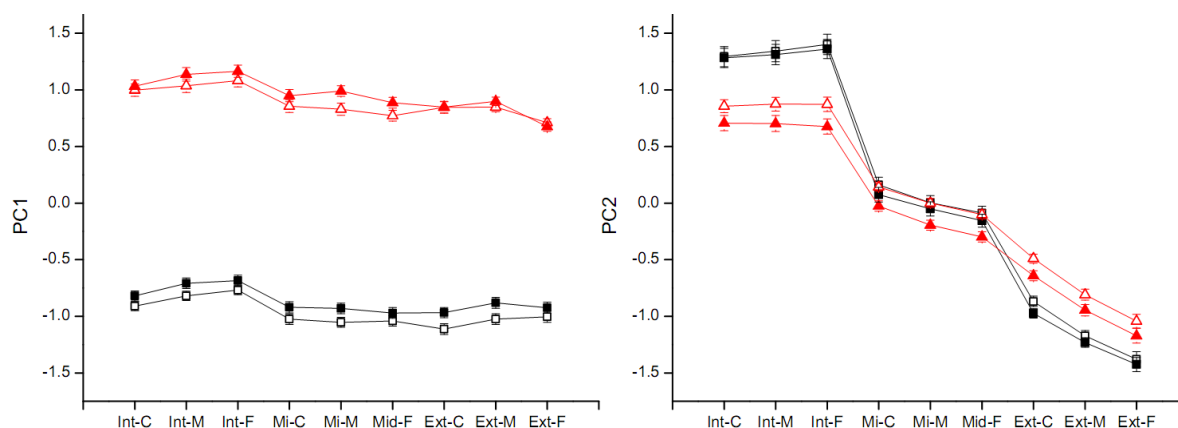


Figure IV-31. La différence entre les points de prise et de dépose sur les axes des composantes principales est minimale. Les points rouges sont les prises par le dessus, et les noirs les prises par le côté ; les symboles pleins sont les points de prises, et les creux ceux de dépose. INT = ligne de points à gauche du sujet, MI = ligne de point centraux, EXT = ligne de points à droite ; C = proche, M = moyen, F = lointain. Adapté de (Touvet, et al. 2013).

b) Les points-cibles centrés sur l'épaule

Parmi les protocoles comportementaux que nous avons pu étudier (Cuijpers, J. et Brenner 2004, Schot, Brenner et J 2010, Paulignan, Frak, et al. 1997, Roby-Brami 2000) aucun ne considérait la position des cibles dans un repère lié à l'épaule mais dans celui attaché au point cyclopéen. Considérant les caractéristiques anisométriques du système épaule-coude (Gomi et Kawato 1996) il est légitime de s'interroger sur la prépondérance du système visuel (qui lui est centré sur la tête) dans le placement de la main.

Les données que nous avons récoltées montrent que l'azimuth de la main est clairement lié à la direction du vecteur mouvement exprimé dans le repère de l'épaule et non dans celui de la tête, et ce quelle que soit l'orientation de l'objet autour de Z_{world} .

V. Modélisation du geste de saisie chez le singe à partir de vidéos

Cette partie présente une méthode de reconstruction 3D de différentes configurations de saisie chez le singe basée sur les principes de la stéréovision et leur implémentation dans un simulateur fidèle du site expérimental.

1. Résumé

Pour mieux comprendre la structure et le fonctionnement du système nerveux central chez l'homme la recherche s'appuie principalement sur le modèle du singe, modèle animal le plus proche à l'homme ; l'étude de la saisie n'échappe à cette règle, et a permis jusqu'à présent de caractériser les signaux corticaux responsables de nos capacités à manipuler les objets, ainsi que leur propagation à travers les différentes structures corticales (Lemon, et al. 2004, Mason, et al. 2004, Umiltà, et al. 2007, Spinks, et al. 2008, Brochier et Lemon 2009, Davare, et al. 2011, et plus généralement MacKenzie et Iberall 1994, Wing, Haggard et Flanagan 1996). Afin de pouvoir reproduire les mouvements effectués par un singe dans le but ensuite d'en analyser la corrélation avec des signaux neuronaux primaires (potentiels d'actions, *Local Field Potential*, etc) nous avons développé un algorithme d'analyse des mouvements du singe et l'avons couplé à une simulation fidèle du protocole expérimental.

La capture du mouvement naturel chez l'animal implique de limiter au maximum toute distraction lors de l'exécution de la tâche ; à la différence de l'homme il est impossible d'utiliser un gant instrumenté et malaisé de placer des marqueurs visuels, en ajoutant à cela que les caméras doivent être hors de portée. Nous avons donc mis en place un programme de reconstruction 3D de la main du singe à partir des signaux vidéo seuls, basé sur l'expertise de l'expérimentateur. Il se décompose en plusieurs phases : extraction et classification des images d'intérêt en fonction de l'objet saisi, détermination de la position de points d'intérêt sur la main pour chaque image, reconstruction 3D et optimisation en fonction des données anatomiques, calcul des angles articulaires. Les configurations tirées de ce processus sont ensuite testées dans un simulateur que nous avons développé en les appliquant à un modèle 3D du bras d'un singe reconstruit à partir d'imagerie médicale.

Travail effectué :

- extension d'un algorithme d'étalonnage stéréoscopique afin de pouvoir utiliser 4 caméras (cascade d'étalonnages),
- développement d'un logiciel de traitement vidéo permettant la détermination de la configuration de la main pour chaque type d'objet,
- simulation dans un environnement 3D fidèle (modèle de la main du singe tiré de données anatomiques).

Contribution :

L'étude du mouvement chez le singe, conjoint avec l'enregistrement de signaux corticaux et/ou musculaires, est une étape primordiale de compréhension des mécanismes équivalents chez l'homme. Le travail effectué dans cette sous-partie participe donc à cette compréhension à travers le développement et l'utilisation d'un outil ne biaisant pas la mesure.

2. Méthodes : Analyse des données vidéo et reconstruction 3d

Dans cette section nous allons présenter dans un premier temps les bases théoriques de la reconstruction 3D-par triangulation, puis l'implémentation que nous en avons faite et enfin l'analyse des données vidéo.

a) Principes de la reconstruction 3d

Utiliser des données vidéo en vue de faire de la reconstruction 3D implique forcément l'utilisation de la stéréoscopie ; en effet, dans le cas de l'utilisation de capteurs passifs et non mobiles il faut au moins deux caméras pour pouvoir « voir » en trois dimensions. Bien que des exemples d'application n'utilisant qu'une seule caméra existent (Jauregui et Horain 2009, Menezes, et al. 2005) ils sont limités à des conditions d'utilisation bien spécifiques et requièrent pour la plupart une connaissance *a priori* de l'objet à « reconnaître », que ce soit via un modèle, une base de connaissance ou autre ; il ne s'agit là pas de réelle reconstruction 3d mais plutôt de détection de poses de l'objet en question.

La stéréovision est directement inspirée de la nature : c'est l'utilisation combinée de nos deux yeux qui nous permet d'évaluer la profondeur d'une scène, la distance qui nous sépare d'un objet ; privé d'un de ces capteurs, ces capacités sont grandement réduites.

Ces principes de triangulation ont été retranscrits sous forme d'algorithmes exploitant les règles de géométrie qui lient deux images entre elles. Ainsi, ce que voit une caméra (son « plan image », l) est constitué d'un certain nombre de points et de droites ; si l'on projette ce plan image sur un second plan situé dans l'axe de la caméra ces points deviennent des lignes de profondeur, et les lignes deviennent des plans. Si maintenant on utilise une seconde caméra dont l'axe croise le champ couvert par la première, il est possible par un jeu de projections de faire concorder les points vus par l'une et l'autre, et que nous pouvons identifier comme appartenant au même objet (Figure V-3).

Ce jeu de projection s'appuie sur les droites épipolaires, qui sont en fait la projection d'un point sélectionné dans le repère d'une caméra vers le repère d'une autre caméra ; si l'on effectue l'opération dans les deux sens, en sélectionnant le même point dans les deux plans image, le point d'intersection des deux droites épipolaires nous donnera la position de notre point dans l'espace.

i) Modélisation d'une caméra.

Modéliser une caméra implique de déterminer deux jeux de paramètres : ses paramètres *intrinsèques*, qui lui sont propres et directement liés à la technologie dont elle est issue, son assemblage, ses réglages ; mais aussi ses paramètres *extrinsèques* qui eux vont dépendre de l'installation et des mesures. Nous allons établir ci-après comment estimer ces deux jeux de paramètres.

D'autre part, une caméra peut être caractérisée par deux relations (Horaud et Monga 1995): la projection des points 3D de l'espace sur le plan image l de la caméra, et qui résulte en points-image 2D (voir Figure V-1) ; et la transformation permettant de passer du repère lié au plan image à un repère métrique, établi par l'étalonnage.

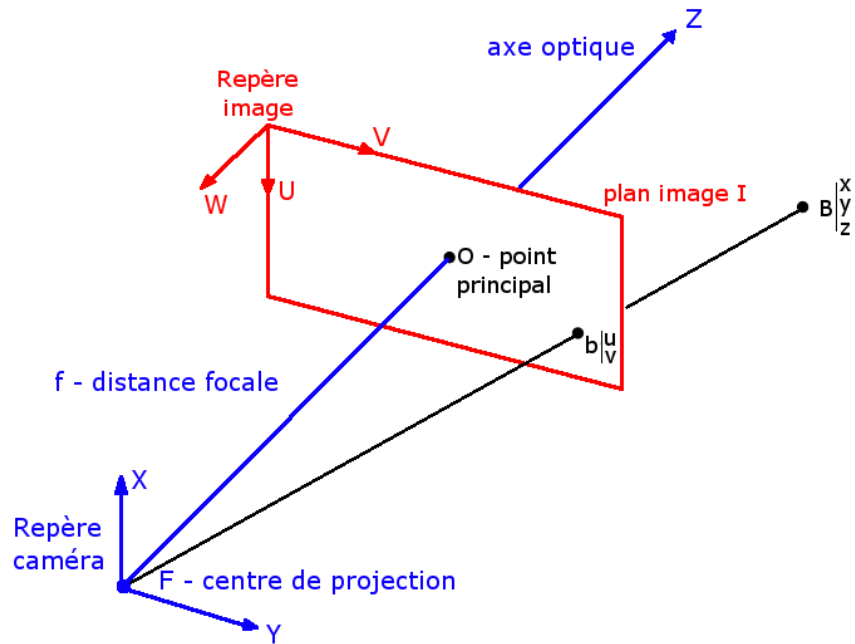


Figure V-1. Le modèle géométrique d'une caméra, caractérisé par le repère caméra [XYZ] d'origine F, la distance focale f et le plan image I auquel est attaché le repère [UVW]. Un point B de l'espace y est projeté en b. Adapté de (Heraud et Monga 1995).

Le modèle géométrique d'une caméra peut être établi à partir de son plan image I ; celui-ci nous donne l'axe optique, confondu avec l'axe Z du repère attaché à la caméra, ainsi que le point principal O, point d'intersection de l'axe optique et du plan image, placé au centre de ce dernier. Le centre F du repère caméra est placé à une distance f du point O, f étant la distance focale propre à la caméra.

L'image d'un point B de coordonnées (x,y,z) dans l'espace sera un point b de coordonnées (u,v) sur le plan image. Pour établir cette relation nous projetons tout d'abord le point B le long de la droite BF en direction de F, ce qui nous permet d'écrire la projection perspective de notre caméra : b est de coordonnées (x', y', z') dans le repère caméra, et ces coordonnées sont liées par une fonction linéaire à celles de B dans ce même repère (voir (Équation V-1) :

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \frac{f}{z} \\ y \frac{f}{z} \\ f \end{bmatrix} \quad \text{Soit} \quad \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \frac{1}{s} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \text{avec } s = \frac{z}{f}$$

On peut écrire cette relation sous forme de transformation homogène :

$$(Équation V-1) \quad \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{s} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

avec la matrice de projection P

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix}$$

La matrice P étant établie, nous pouvons maintenant déterminer la transformation entre le repère caméra et le repère image. Pour cela nous exprimons F dans le repère image en lui attribuant le jeu de coordonnées (u_0, v_0, w_0) et nous introduisons les facteurs d'échelle k_u et k_v , qui concernent respectivement l'axe vertical U et l'axe horizontal V . On obtient alors la relation de projection de b d'un repère à l'autre :

$$(Équation V-2) \quad \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & 0 & 0 \\ 0 & k_v & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \end{bmatrix}$$

On peut exprimer cette relation sous forme de matrice homogène (Équation V-3), à laquelle on enlèvera par la suite la composante suivant W (toujours nulle puisque les points appartiennent au plan U - V), ce qui nous donnera la matrice K :

$$(Équation V-3) \quad \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_u & 0 & 0 & u_0 \\ 0 & k_v & 0 & v_0 \\ 0 & 0 & 0 & w_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix}$$

Avec la matrice de transformation K (sans la composante W)

$$K = \begin{bmatrix} -k_u & 0 & 0 & u_0 \\ 0 & k_v & 0 & v_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Nous avons maintenant nos deux matrices de passage ; nous allons pouvoir exprimer les paramètres intrinsèques de la caméra. Commençons par faire le produit KP afin de passer du repère caméra au repère image.

$$KP = \begin{bmatrix} -k_u & 0 & \frac{u_0}{f} & 0 \\ 0 & k_v & \frac{v_0}{f} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f} & 0 \end{bmatrix}$$

Si nous multiplions le tout par f (ce qui n'a pas d'impact sur la relation) nous obtenons la matrice I_c qui lie les deux espaces en transformant $B(x,y,z)$ en $b(u,v)$ (Équation V-4) ; grâce à elle nous obtenons les quatre paramètres relatifs à la caméra. On notera le facteur d'échelle s hérité de l' (Équation V-1).

(Équation V-4)

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = I_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

avec

$$I_c = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

u_0 et v_0 , coordonnées de F dans UVW (point O)

α_u et α_v , rapport de projection entre la distance focale f et les axes U et V :

$$\alpha_u = -k_u f \quad \text{et} \quad \alpha_v = k_v f$$

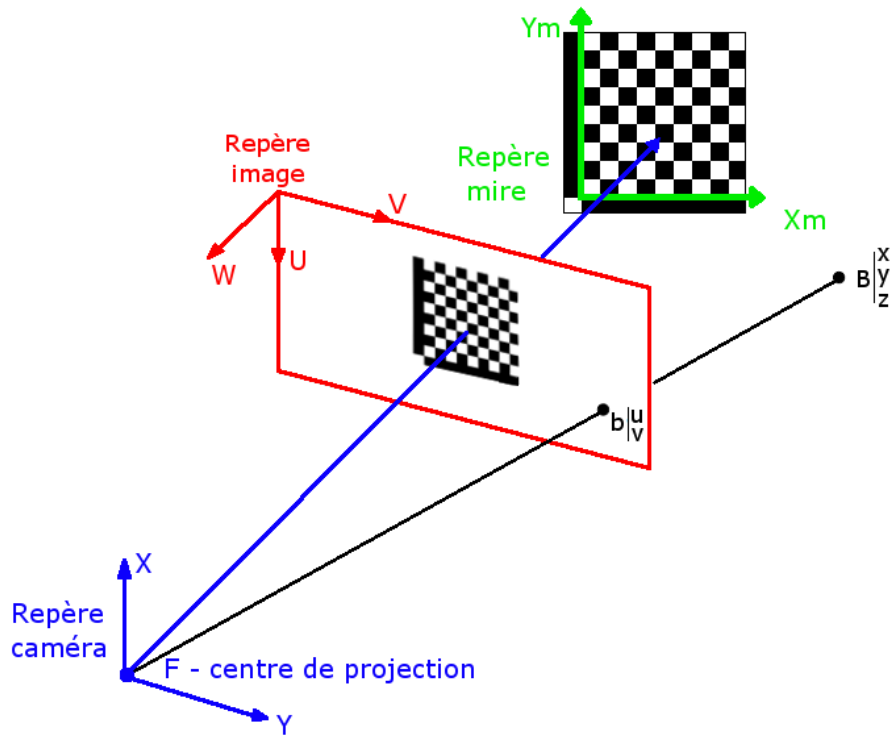


Figure V-2. L'utilisation d'un outil d'étalonnage (ou mire) dont on connaît toutes les caractéristiques dans le repère $(X_m Y_m Z_m)$ permet d'évaluer les paramètres extrinsèques du système dans lequel vient se placer la caméra. D'après (Horaud et Monga 1995)

Enfin, nous pouvons maintenant déterminer les paramètres extrinsèques de la caméra. Pour ce faire nous allons avoir besoin d'un objet d'étalonnage (aussi appelée mire, voir Figure V-2), dont les points sont parfaitement connus dans un repère qui lui est propre, différent de celui de la caméra. Cet objet est généralement une grille ou un damier dont les carreaux sont réguliers (ce qui sera le cas ici). Chacun des points de l'objet-mire est projeté dans le plan image, où l'on mesure ses coordonnées dans le repère image. Suivant la logique des relations établies précédemment, le seul élément manquant se trouve être la transformation E_c , composée d'une matrice de rotation et d'un vecteur de translation et permettant de passer du repère mire $(X_m Y_m Z_m)$ au repère caméra (Équation V-5) ; ensuite, le passage caméra/image sera celui que nous venons de calculer.

(Équation V-5)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = E_c \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{avec } E_c = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Le passage du repère mire au repère image est constitué par le produit $I_c E_c$ sous la forme de la matrice de projection perspective M_c qui va nous permettre ensuite d'évaluer **tous** les paramètres de la caméra.

(Équation V-6)

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M_c \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{bmatrix}$$

Avec $M_c = I_c E_c = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

$$M_c = \begin{bmatrix} \alpha_u r_{11} + u_0 r_{31} & \alpha_u r_{12} + u_0 r_{32} & \alpha_u r_{13} + u_0 r_{33} & \alpha_u t_x + u_0 t_z \\ \alpha_v r_{21} + v_0 r_{31} & \alpha_v r_{22} + v_0 r_{32} & \alpha_v r_{23} + v_0 r_{33} & \alpha_v t_y + v_0 t_z \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix}$$

Ou, si l'on adopte la forme réduite

$$M_c = \begin{bmatrix} \alpha_u r_1 + u_0 r_3 & \alpha_u t_x + u_0 t_x \\ \alpha_v r_2 + v_0 r_3 & \alpha_v t_y + v_0 t_y \\ r_3 & t_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & m_{14} \\ m_2 & m_{24} \\ m_3 & m_{34} \end{bmatrix} \quad \text{avec } r_i = (r_{i1} \ r_{i2} \ r_{i3}) \text{ et de même } m_i = (m_{i1} \ m_{i2} \ m_{i3})$$

Ce qui nous permet d'établir une estimation des différents éléments de notre caméra par identification, en respectant les contraintes liées aux différentes transformations impliquées :

Paramètres intrinsèques :

$$\begin{cases} u_0 = m_1 \cdot m_3 \\ v_0 = m_2 \cdot m_3 \\ \alpha_u = -\|m_1 \wedge m_3\| \\ \alpha_v = \|m_2 \wedge m_3\| \end{cases}$$

Paramètres extrinsèques :

$$\begin{cases} r_1 = (\alpha_u (m_1 - u_0 m_3))^{-1} \\ r_2 = (\alpha_v (m_2 - v_0 m_3))^{-1} \\ r_3 = m_3 \\ t_x = (\alpha_u (m_{14} - u_0 m_{34}))^{-1} \\ t_y = (\alpha_v (m_{24} - v_0 m_{34}))^{-1} \\ t_z = m_{34} \end{cases}$$

ii) **Étalonnage d'une caméra**

Afin d'estimer tous nos paramètres nous devons étalonner notre caméra, c'est-à-dire trouver la matrice M_c . Pour se faire il suffit d'utiliser une mire de calibrage et de mesurer la position de points appartenant à cette mire dans le plan image (Figure V-2) ; connaissant à la fois la position des points dans le Repère mire et le Repère image nous pouvons estimer ses paramètres.

Un point appartenant à la mire aura pour coordonnées image (Équation V-6) :

$$u = \frac{m_{11}x_m + m_{12}y_m + m_{13}z_m + m_{14}}{m_{31}x_m + m_{32}y_m + m_{33}z_m + m_{34}}$$

(Équation V-7)

$$v = \frac{m_{21}x_m + m_{22}y_m + m_{23}z_m + m_{24}}{m_{31}x_m + m_{32}y_m + m_{33}z_m + m_{34}}$$

Ces coordonnées nous donnent deux équations solution de M_c pour un point de la mire ; sachant que cette matrice comporte 12 coefficients nous auront donc besoin au minimum de 6 points, soit pour chaque point i :

$$u_i m_{34} = m_{11}x_{m,i} + m_{12}y_{m,i} + m_{13}z_{m,i} + m_{14} - u_i (m_{31}x_{m,i} + m_{32}y_{m,i} + m_{33}z_{m,i})$$

(Équation V-8)

$$v_i m_{34} = m_{21}x_{m,i} + m_{22}y_{m,i} + m_{23}z_{m,i} + m_{24} - v_i (m_{31}x_{m,i} + m_{32}y_{m,i} + m_{33}z_{m,i})$$

Soit sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} u_i m_{34} \\ v_i m_{34} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_{m,i} & y_{m,i} & z_{m,i} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_i x_{m,i} & -u_i y_{m,i} & -u_i z_{m,i} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{m,i} & y_{m,i} & z_{m,i} & 1 & -v_i x_{m,i} & -v_i y_{m,i} & -v_i z_{m,i} \end{bmatrix}}_{\text{Avec la matrice d'étalonnage } C_m} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{24} \\ m_{31} \\ m_{32} \\ m_{33} \end{bmatrix}$$

Le système établi à l'(Équation V-8 étant homogène, sa solution sera correcte à un facteur d'échelle près. Il existe plusieurs techniques pour fixer ce facteur, la plus commune étant la minimisation de l'erreur du système d'équation au sens des moindres carrés. Pour cela on peut procéder par exemple au calcul de la pseudo-inverse de C_m , ou encore par l'approximation par Décomposition en Valeurs Singulières du système. Une autre approche, basée sur la minimisation de l'erreur de reprojection (à savoir la projection d'un espace vers un second, puis l'inverse) via une descente de gradient, a été proposée et implémentée dans une boîte à outils Matlab par J Bouguet (Bouguet). C'est celle-ci que nous utiliserons dans les sections 2.c) et d).

iii) Modélisation et étalonnage d'un système de stéréoscopie

Comme expliqué en début de chapitre, la reconstruction 3d à partir de données image 2D n'est possible qu'à travers l'utilisation d'un capteur stéréoscopique. Cela revient à utiliser au moins deux caméras qui observent le même espace de travail, et que l'on va étalonner selon la méthode présentée dans les sections précédentes ; ensuite il faudra encore établir la matrice de transformation entre ces deux caméras afin que les différents éléments du système (caméra gauche, caméra droite, points mesurés) soient exprimés dans un seul et même repère (celui de la caméra gauche, en l'occurrence). C'est ce qui est réalisé par l'étalonnage stéréoscopique.

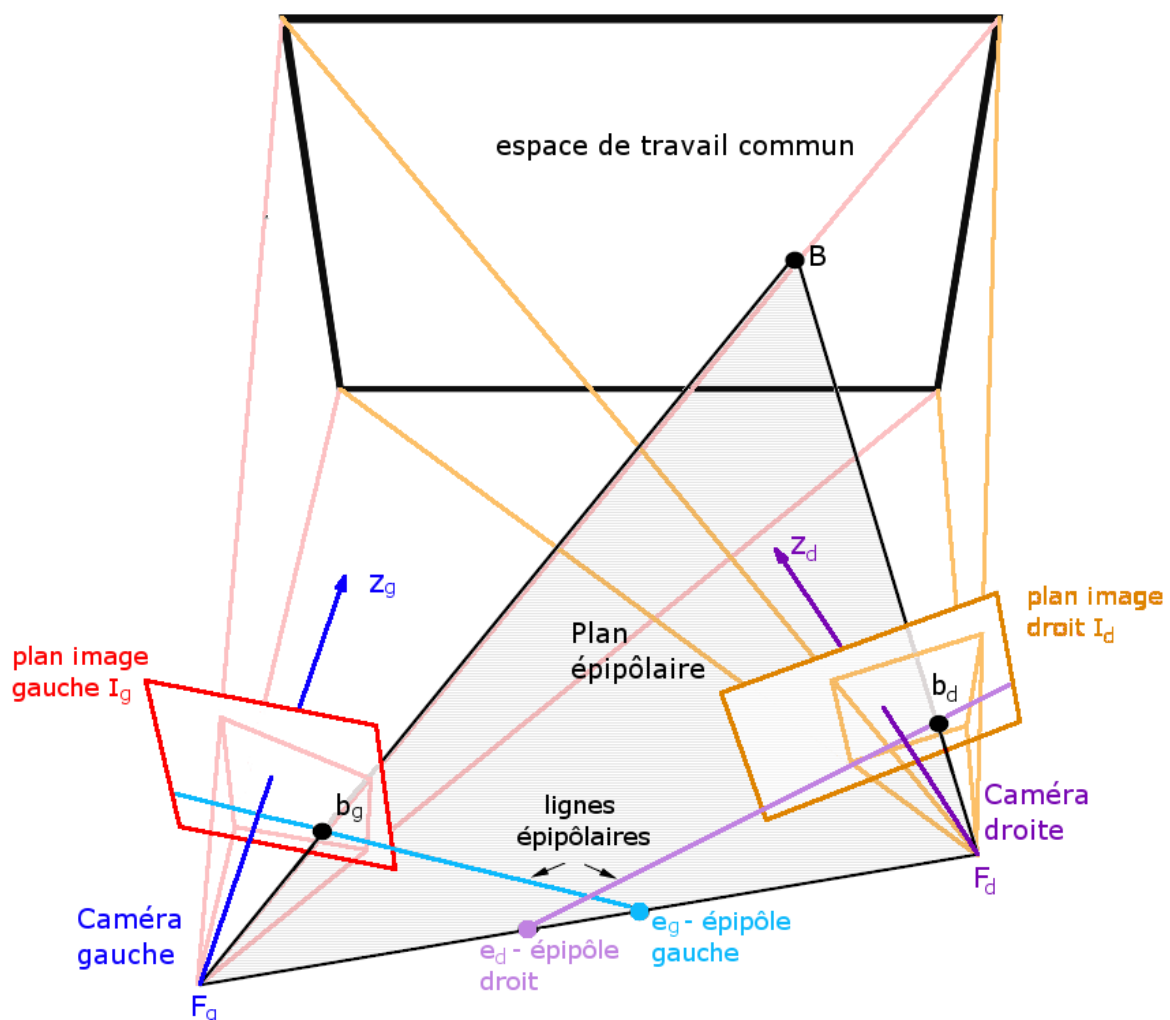


Figure V-3. Un montage stéréoscopique classique, constitué de deux caméras (respectivement « gauche » et « droite ») orientées de manière à voir le même espace de travail. Le point B est projeté sur le plan image des deux caméras, et les deux points b_g et b_d nous permettent de tracer les droites épipolaires, elles-mêmes projections des centres caméra dans le repère l'une de l'autre. Le plan épipolaire relie les points F_g , F_d et B ; il constitue l'ensemble des solutions de l'estimation de la position du point B par le système, avant étalonnage du capteur stéréoscopique. D'après (Horaud et Monga 1995).

Soit un point B de l'espace, ayant pour coordonnées (x_g, y_g, z_g) dans le Repère caméra gauche et (x_d, y_d, z_d) dans le Repère caméra droite ; sa projection sur les plans images I_g et I_d donnera respectivement les points $b_g(x'_g, y'_g, 1)$ et $b_d(x'_d, y'_d, 1)$ (Figure V-3). L'étalonnage de chaque caméra nous a donné les matrices M_c qui leur correspondent et par conséquent les matrices « extrinsèques » E_{cg} et E_{cd} . Le passage de la caméra de gauche à la caméra de droite sera le produit de la seconde avec l'inverse de la première :

$$(Équation V-9) \quad E_s = E_{cd} E_{cg}^{-1}$$

Comme précédemment, cette matrice peut s'écrire

$$E_s = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{ou encore} \quad E_s = \begin{bmatrix} r_1 & t_x \\ r_2 & t_y \\ r_3 & t_z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On a désormais

$$(Équation V-10) \quad \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \\ 1 \end{bmatrix} = E_s \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \\ 1 \end{bmatrix}$$

Si l'on applique le facteur d'échelle (nous avons vu précédemment que cela n'affectait pas la relation), nous pouvons exprimer les projections p_g et p_d en fonction des coordonnées du point P :

$$p_g = \begin{bmatrix} x'_g \\ y'_g \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_g/z_g \\ y_g/z_g \\ 1 \end{bmatrix}, \quad p_d = \begin{bmatrix} x'_d \\ y'_d \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d/z_d \\ y_d/z_d \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{soit}$$

$$x'_d = \frac{r_{11}x_g + r_{12}y_g + r_{13}z_g + t_x}{r_{31}x_g + r_{32}y_g + r_{33}z_g + t_z} = \frac{z_g (r_{11}x'_g + r_{12}y'_g + r_{13}) + t_x}{z_g (r_{31}x'_g + r_{32}y'_g + r_{33}) + t_z} \quad (1)$$

(Équation V-11)

$$y'_d = \frac{r_{21}x_g + r_{22}y_g + r_{23}z_g + t_y}{r_{31}x_g + r_{32}y_g + r_{33}z_g + t_z} = \frac{z_g (r_{21}x'_g + r_{22}y'_g + r_{23}) + t_y}{z_g (r_{31}x'_g + r_{32}y'_g + r_{33}) + t_z} \quad (2)$$

Ce qui nous permet d'exprimer la position d'un point dans le repère image de la caméra de droite en fonction de sa position dans le repère image de la caméra de gauche, des paramètres du système et de la composante en Z du point initial B, autrement dit l'ensemble des points du plan épipolaire (voir Figure V-3). Afin de trouver une (et une seule) solution nous devons dans un premier temps réduire cet ensemble à une droite : la ligne épipolaire. Pour ce faire nous exprimons z_g en fonction des autres variables et résolvons le système de l'(Équation V-11.

$$D'après (Équation V-11,2) \quad z_g = \frac{y'_d t_z - t_y}{(r_{21}x'_g + r_{22}y'_g + r_{23}) - y'_d (r_{31}x'_g + r_{32}y'_g + r_{33})}$$

Pour la suite du raisonnement nous adopterons la notation simplifiée :

$$\begin{aligned} R_1 &= r_{11}x_g + r_{12}y_g + r_{13} \\ R_2 &= r_{21}x_g + r_{22}y_g + r_{23} \\ R_3 &= r_{31}x_g + r_{32}y_g + r_{33} \end{aligned} \quad \text{soit} \quad z_g = \frac{y_d' t_z - t_y}{R_2 - y_d' R_3}$$

En injectant z_g dans (Équation V-11,1), on a

$$x_d' \left(\frac{R_3(y_d' t_z - t_y)}{R_2 - y_d' R_3} + t_z \right) = \frac{R_1(y_d' t_z - t_y)}{R_2 - y_d' R_3} + t_x$$

Soit, si l'on multiplie par $R_2 - y_d' R_3$

$$x_d' [R_3(y_d' t_z - t_y) + t_z(R_2 - y_d' R_3)] = R_1(y_d' t_z - t_y) + t_x(R_2 - y_d' R_3) \quad \text{puis}$$

$$x_d' y_d' (R_3 t_z - R_3 t_y) + x_d' (R_2 t_z - R_3 t_y) = y_d' (R_1 t_z - R_3 t_x) + R_2 t_x - R_1 t_y \quad \text{et enfin}$$

$$\text{(Équation V-12)} \quad y_d' = - \frac{(R_2 t_z - R_3 t_y)}{(R_1 t_z - R_3 t_x)} x_d' + \frac{R_1 t_y - R_2 t_x}{(R_1 t_z - R_3 t_x)}$$

L'(Équation V-12 est l'équation de la droite épipolaire de la caméra droite, sur laquelle se placent tous les points de l'image de droite pouvant correspondre au point b_g . Une telle droite existe pour chaque point de l'image de gauche, et l'ensemble de ces droites converge en un point unique appelé épipôle (voir le point e_d sur les Figure V-3 et Figure V-4). Ce point est en fait la projection du centre F de la caméra de gauche dans le repère image de la caméra de droite.

iv) Rectification épipolaire

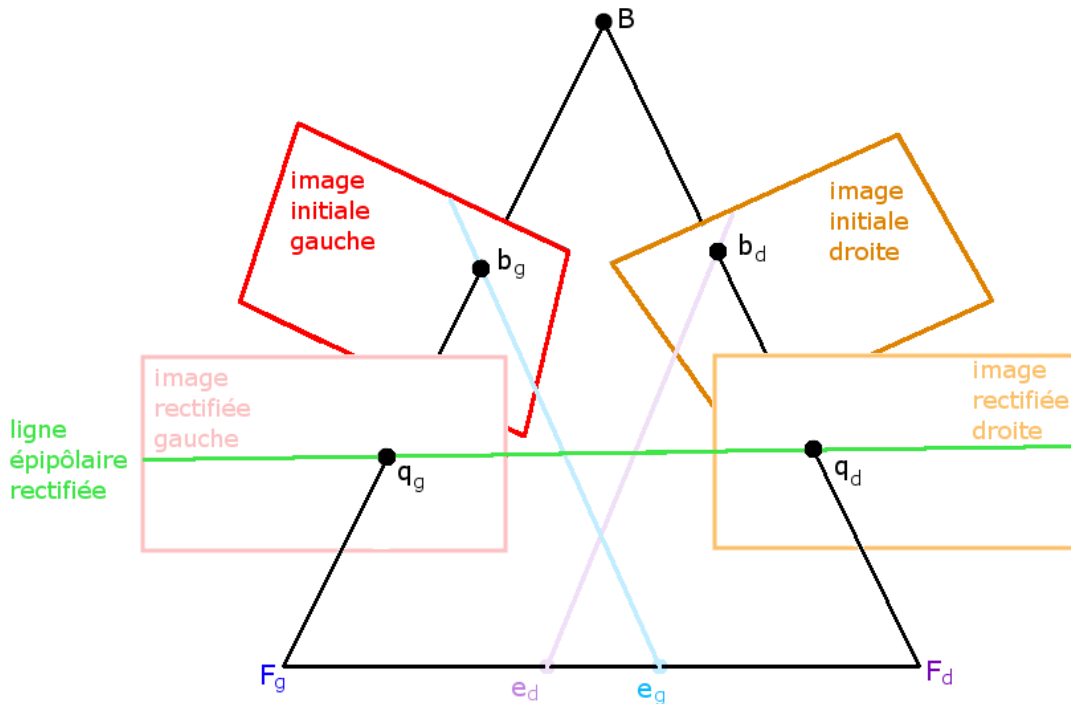


Figure V-4. Principe de la rectification épipolaire. Les images des caméras gauche et droite sont transformées géométriquement de manière à faire se confondre leurs lignes épipolaires respectives ; le passage d'un repère à l'autre devient alors une simple translation. D'après(Horaud et Monga 1995)

Afin de simplifier la résolution du problème d'appariement entre l'image de gauche et celle de droite, nous allons chercher à créer une configuration où cet appariement ne requerra pas le calcul de la droite épipolaire : nous allons rectifier l'orientation des caméras afin qu'elles soient parallèles. Ainsi les lignes épipolaires droite et gauche seront confondues, et la projection du point b_g sur l'image de droite se fera de manière directe au travers d'une matrice E_s simplifiée (voir (Équation V-13)). Cette manipulation n'impacte que les paramètres extrinsèques de chaque caméra et ne modifie pas la relation qui lie F_g à F_d .

(Équation V-13)
$$E_{s_rectif} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & t_{rectif} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ avec } t_{rectif} = \sqrt{t_x^2 + t_y^2 + t_z^2}$$

Les bases de fonctionnement des caméras étant établies, nous ~~allons~~ pouvons maintenant examiner le système complet.

b) Site expérimental et système d'acquisition

Le site expérimental de capture des mouvements effectués par le singe lors de tâches de saisie est constitué d'un plateau sur lequel prennent place un carrousel et deux reposeirs (un par main), placé sous une vitre sans tain et le tout à l'intérieur d'une boîte l'isolant des sources de lumière extérieures (ceci afin d'éviter toute perturbation pendant l'exécution des tâches). Le système de capture que nous avons mis en place compte quatre caméras, placées de manière homogène autour de l'animal et visant le point-cible constitué par l'objet à saisir (voir Figure V-5).

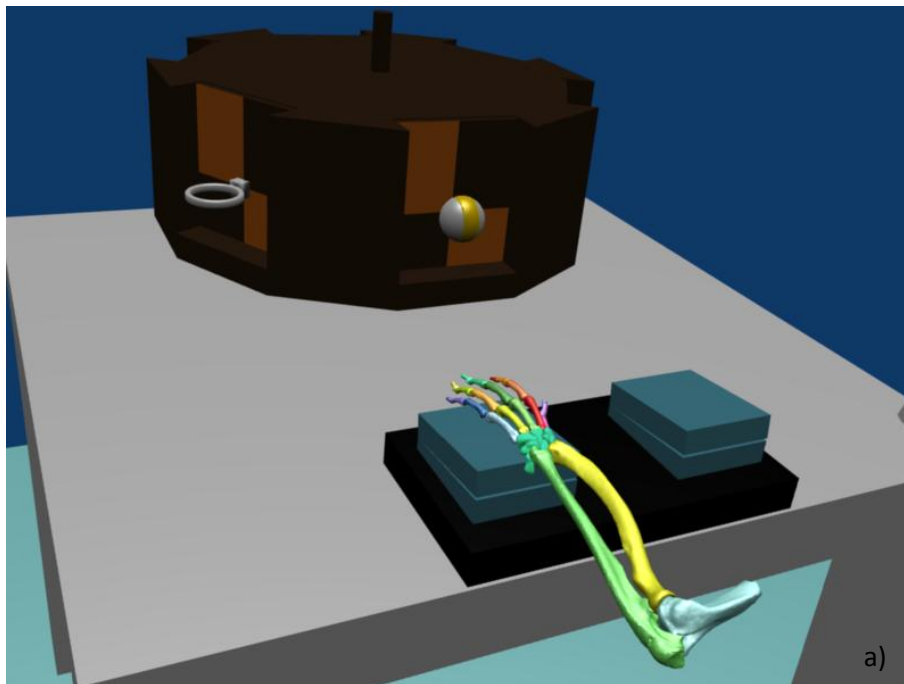
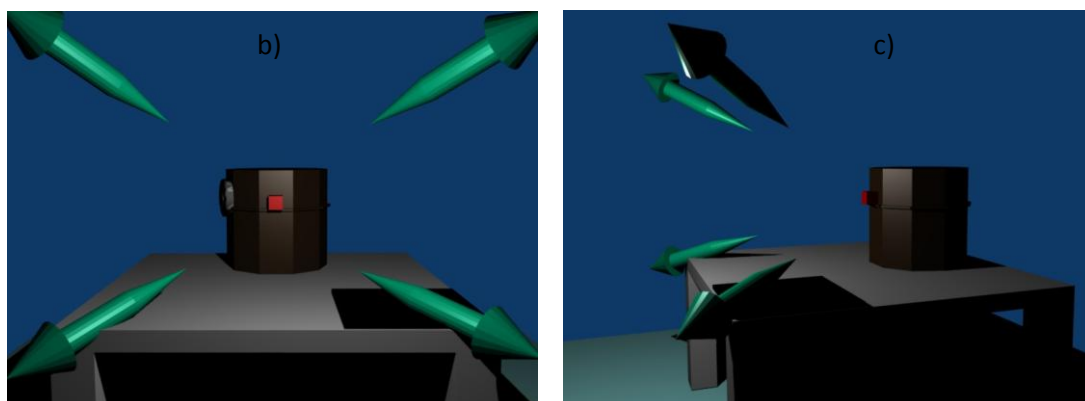


Figure V-5. Simulation du site expérimental (pour plus de clarté seul le plateau a été représenté). a) Vue du carrousel, des reposeirs et du modèle de la main du singe en position initiale. b) et c) représentation de l'implantation et de l'axe de vue des quatre caméras vis-à-vis de la table.



La capture d'image des quatre caméras est synchronisée via une carte d'acquisition, ce qui est obligatoire si l'on veut reconstruire la pose statique d'un objet en mouvement (ici, la main du singe). Ces images sont ensuite stockées sous forme de films individuels (voir Figure V-6 pour un exemple) et sont traitées sous Matlab.



Figure V-6. Jeu de captures d'image pour l'objet « Petit Anneau ». Les lignes de vues de caméras sont centrées au mieux sur l'objet et leur focus est réglé de manière à distinguer la main entière lors de la saisie. HL : caméra placée à l'angle supérieur gauche ; HR : caméra à l'angle supérieur droit ; LL : caméra à l'angle inférieur gauche ; LR : caméra à l'angle inférieur droit.

Les expérimentations en elles-mêmes consistaient à ce que le singe saisisse toute une gamme d'objets de tailles et de formes différentes, correspondant chacun à un type de saisie appris (Spinks, et al. 2008, Umilta, et al. 2007). Chacun de ces objets était fixé à une des faces du carrousel, qui tournait de manière à placer l'objet à saisir en face de l'animal. Le tirage de l'objet à saisir était aléatoire, et la rotation du carrousel s'effectuait dans le noir complet afin d'éviter que le singe n'anticipe la tâche. Ce détail a son importance si l'on sait que des signaux corticaux étaient enregistrés lors du déroulement de la tâche.

Les objets étaient au nombre de sept : un cube, un petit anneau, un grand anneau, une sphère, une plaque, un cône et enfin un petit cube contraint dans une structure afin de limiter sa saisie à une prise de précision bi-digitale (nommé ci-après « cube de précision »). Ils ont tous été modélisés et intégrés à la simulation d'après mesures (voir Tableau V-1).

Tableau V-1. Les objets utilisés lors des expérimentations sur le singe, leurs dimensions et orientation selon la direction d'atteinte, ainsi que le type de saisie auquel ils correspondent.

nom	dim. 1 (mm)	dim. 2 (mm)	dim. 3 (mm)	angle (°)	Type de prise
Cube	26	26	30	0	Prise en force
Petit anneau	18	4	18	0	Crochet avec l'index
Grand anneau	38	6	38	0	Crochet avec la main entière
Sphère	30.5	30.5	30.5	0	Prise en force
Plaque	25	5	78	0	Prise pulpo-latérale
Cône	35	35	30	0	Prise pulpo-latérale
Cube de précision	14.5	14.5	14.5	45	Prise de précision

c) Étalonnage du système.

L'algorithme d'étalonnage utilisé est celui présenté par J. Bouguet (Bouguet) ; il permet de calibrer chaque caméra de manière individuelle mais aussi de les apparier deux à deux afin de faire de la stéréovision, suivant les principes énoncés dans les sections 2i) à 2iv). Cet algorithme a été modifié afin de le plier à nos exigences, à savoir

- Pouvoir réaliser des étalonnages « en cascade » et ainsi faire travailler les quatre caméras dans le même repère de référence en n'utilisant que des étalonnages par paires
- Pouvoir projeter un point depuis n'importe quel repère vers n'importe quel autre (et non se limiter à une projection type « gauche vers droite »)

Nous allons maintenant reprendre point par point les différentes étapes de l'étalonnage du système.

i) Détermination du Repère mire

Comme expliqué précédemment, pour pouvoir calibrer les caméras il est nécessaire de prendre des prises de vues (photos, vidéo) d'un objet servant de référence (ici un échiquier, voir Figure V-2 et Figure V-7) avec les quatre caméras en même temps. Cela implique que la mire soit visible depuis les quatre points de vue (position dans le domaine de travail commun) et utilisable par les quatre caméras (orientation permettant de voir clairement les carreaux de la grille). Il est nécessaire de varier autant que possible ces deux paramètres (position et orientation) afin d'obtenir un étalonnage le plus fin possible. L'auteur de la boîte à outils suggère une vingtaine d'images mais pour notre système nous en utilisons en général une quarantaine (à cause de la distance des caméras à la cible et de leur résolution).

Pour chaque image nous avons déterminé l'orientation du Repère mire en sélectionnant les quatre points qui forment le plan $(X_m Y_m)$, en suivant toujours la même séquence (voir Figure V-7). Une fois ceci fait le logiciel évalue les éléments de la matrice M_c et en déduit une estimation des paramètres intrinsèques et extrinsèques de chaque caméra, ainsi que la marge d'erreur qui leur correspond.

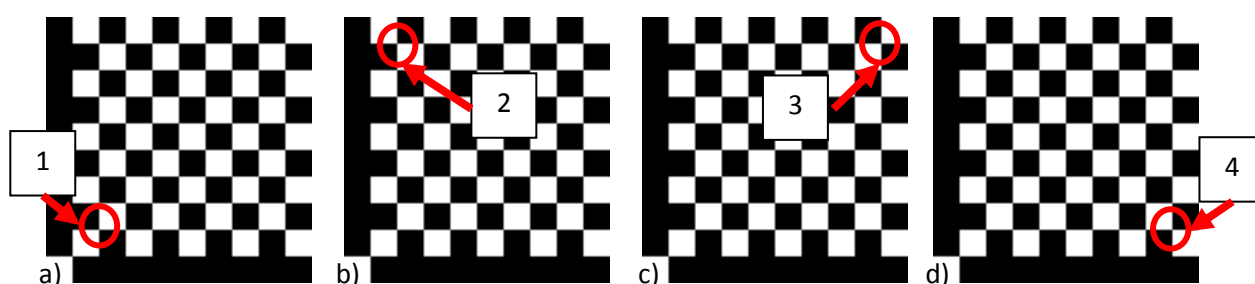
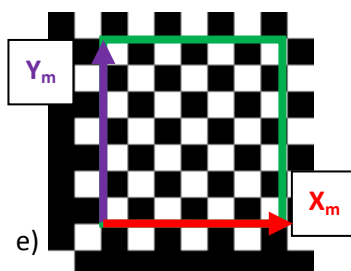


Figure V-7. Exemple de mire d'étalonnage : grille de 9x9 carreaux de 5mm, avec marquage du point d'origine sur le côté inférieur gauche. a) à d) Séquence à suivre afin d'établir le référentiel lié à la grille (sélection des coins). e) résultat de l'étalonnage



ii) **Étalonnage des paires de caméras pour vision stéréoscopique**

Une fois chaque caméra calibrée nous pouvons les apparier les unes aux autres afin de créer un nouveau capteur capable de reconstruire la position 3d des points qu'il voit. Pour plus de simplicité mais aussi afin de réduire le temps de calcul du processus et de pouvoir tracer facilement une possible erreur de reconstruction, nous avons choisi non pas de mettre en relation les quatre caméras en une seule fois mais de procéder par paires. Nous obtenons ainsi six capteurs stéréo différents, soit un par combinaison possible entre les caméras (voir Figure V-8, a).

Comme indiqué sur la Figure V-6, nous avons établi la convention suivante pour notre système:

- **HL** pour la caméra supérieure gauche (*High-Left camera*)
- **HR** pour la caméra supérieure droite (*High-Right camera*)
- **LL** pour la caméra inférieure gauche (*Low-Left camera*)
- **LR** pour la caméra inférieure droite (*Low-Right camera*)

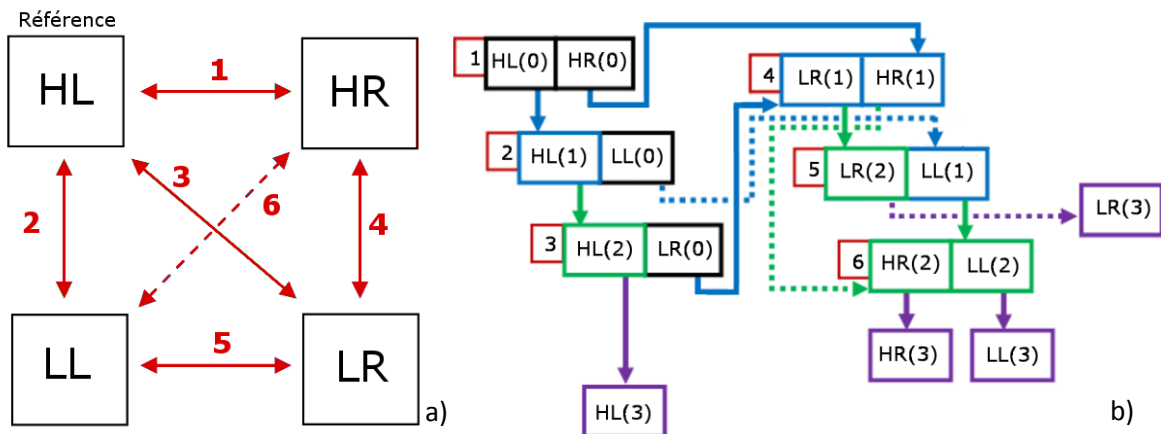


Figure V-8. Le processus d'appariement des caméras. a) Les six étalonnages stéréoscopiques nécessaires au fonctionnement du système. b) La séquence d'étalonnage des différentes paires stéréo. Chaque étage d'étalonnage affine l'estimation des paramètres liés aux caméras donnée par le précédent, ainsi, à la fin des trois étages chaque caméra a été ajustée vis-à-vis des trois autres : le système est homogène. Le numéro d'indice indique le niveau de l'étalonnage, 0 correspond à l'étalonnage de caméra individuelle.

Nous avons arbitrairement désigné la caméra HL comme celle servant de référence au système ; à la fin du traitement tous les points sont exprimés dans son repère. Afin d'obtenir un résultat homogène entre les différentes paires de caméras nous les avons étalonnées en injectant les paramètres estimés à chaque itération dans la suivante (voir Figure V-8, b). L'étalonnage individuel des caméras sert de base et est ainsi ajusté en fonction des trois appariements avec les autres caméras ; à la fin de cette séquence les paramètres de chaque caméra ont ainsi été influencés par les autres et le tout converge vers un système unique et stable : quelle que soit la combinaison de caméras utilisée pour définir un point dans l'espace sa dispersion dans le repère HL vis-à-vis des solutions données par les autres combinaisons sera minimisée.

Ce sont donc les derniers étages d'étalonnage ($HL(3)$, $HR(3)$, $LL(3)$, $LR(3)$) qui ont servi pour calibrer l'ensemble du système via les six paires de caméras.

d) Traitement des données vidéo

i) Extraction des images

Dans un premier temps nous avons traité les vidéos du singe en train de réaliser la tâche afin d'en extraire les images correspondant aux configurations de prise. La tâche effectuée se décomposait en six étapes :

- Phase « aveugle », durant laquelle le carrousel tournait de manière à présenter au singe l'objet à saisir, le tout dans le noir complet
- Phase d'attente du signal « go », matérialisé par l'allumage de la lumière puis d'une lampe verte
- Phase d'atteinte
- Phase de saisie de l'objet
- Phase de maintien de l'objet pendant deux secondes
- Phase de retour de la main sur le reposoir

A chaque essai réalisé par le singe correspond une configuration statique de la main, extraite durant la phase de maintien.

Afin d'extraire ces configurations nous avons développé une interface permettant de manipuler les séquences d'acquisition. Celle-ci propose à l'expérimentateur de lancer une vidéo et de sélectionner à la main chaque image digne d'intérêt (voir Figure V-9) ; à chaque appui sur le bouton de sélection l'index de l'image est stocké dans un vecteur. Il est bien entendu possible de sauter le reste de la vidéo (utile lors des phases de test) ou encore d'effectuer une pause dans le traitement de celle-ci, sachant que les vidéos sont traitées en léger accéléré (une image sur deux est vue par l'expérimentateur) et qu'une vidéo typique dure entre vingt et quarante minutes.

Une fois la sélection effectuée sur la première vidéo, les trois autres sont automatiquement segmentées de la même façon grâce au vecteur d'indices.



Figure V-9. L'interface utilisateur développée afin d'extraire les configurations de prise sur les objets. Trois boutons permettent de sélectionner l'image affichée (« This frame ! »), de mettre en pause le traitement (« Pause ») et de l'arrêter en sautant le reste du film (« Skip »). Un compteur affiche le nombre d'images sélectionnées.

ii) Sélection des points d'intérêt

Une fois les images extraites il faut déterminer les points que l'on souhaite reconstruire dans l'espace. Ces points ont été choisis au nombre de 22 et sont présentés sur la Figure V-10 ; ils correspondent aux extrémités des doigts et à leurs articulations discernables en surface (toutes sauf celles au niveau du carpe), aux processus styloïdes radial et ulnaire du poignet et enfin au centre de l'objet. A chaque point a été attribué un code couleur afin de faciliter leur distinction ; celui qui correspond aux doigts est le même que celui que nous avons utilisé dans les chapitres précédents.

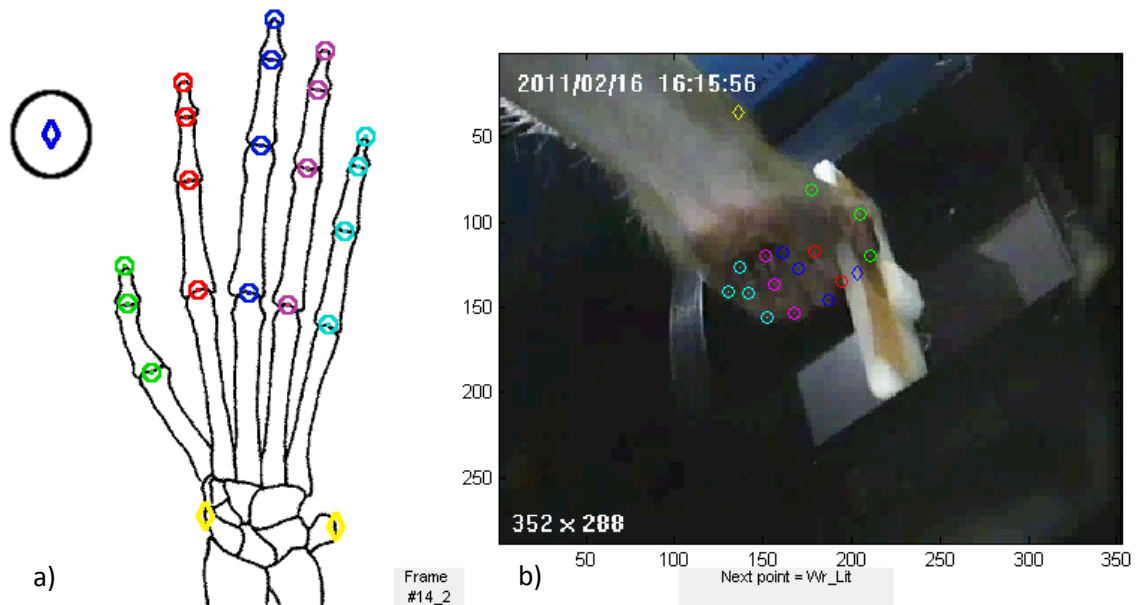


Figure V-10. Les points mesurés en vue de reconstruction. a) Répartition théorique des points sur la main du singe. b) Exemple de marquage des points sur une configuration de prise vue depuis la caméra HR.

Dans cette partie du traitement chaque image sélectionnée précédemment (soit quatre fois le nombre de configurations, une par film original) est affichée et l'utilisateur doit cliquer sur les points non occultés, en respectant une séquence pré-établie (si le point à sélectionner n'est pas visible il est possible de le passer).

Afin de pouvoir reconstruire un point il faut qu'il soit visible sur au moins deux des quatre vues ; s'il apparaît sur plus il sera reconstruit en utilisant tous les appariements possibles (trois pour trois vues, six pour quatre). Cette phase s'appuie principalement sur les compétences anatomiques de l'utilisateur, le système ne suggérant pas d'emplacement pour les points en cours d'utilisation. Si une erreur est survenue durant l'étape précédente et que l'image présentée n'est pas utilisable il est possible de l'exclure définitivement de l'étude à ce moment.

iii) Reconstruction

Une fois les vecteurs de coordonnées établis la reconstruction à proprement parler peut commencer : pour chaque point le système que nous avons développé va chercher à obtenir la position 3d de celui-ci dans le référentiel de la caméra HL, à partir de neuf points-solution (voir Figure V-11). Ces points-solution sont obtenus par triangulation via les six appariements définis précédemment (Figure V-8, a) :

- Les appariements 1, 2 et 3 génèrent chacun une solution directement dans le repère HL ; leurs correspondance dans les autres repères sont ignorées
- Les appariements 4 et 5 génèrent chacun une solution dans le repère LR, ainsi qu'une solution dans les repères HR et LL, respectivement ; ces dernières sont stockées dans un vecteur *points « droite »* pour le traitement final, tandis que les premières sont projetées dans le repère HL en utilisant l'inverse de la relation 3
- L'appariement 6 génère une solution dans le repère HR et son correspondant dans le repère LL ; celui-ci est stocké à son tour dans le vecteur *points « droite »* tandis que le premier est projeté dans HL par l'inverse de la relation 2
- Enfin les points stockés dans *points « droite »* sont projetés vers HL via l'inverse des relations qui leur correspond : l'appariement 1 pour le premier point exprimé dans HR, l'appariement 2 pour les deux autres venant de LL

Le logiciel calcule le centre du nuage de points formé par les projections dans le repère HL, et vérifie que la distance euclidienne de ces points ne dépasse pas un certain seuil ; si c'est le cas il élimine les points concernés et recalcule le centre : ce dernier sera le point-solution retenu. Dans le cas où un point n'ait pas été marqué dans les quatre repères caméra, le logiciel commence par générer toutes les solutions à sa disposition et les projette dans le ou les repères où le point n'apparaît pas.

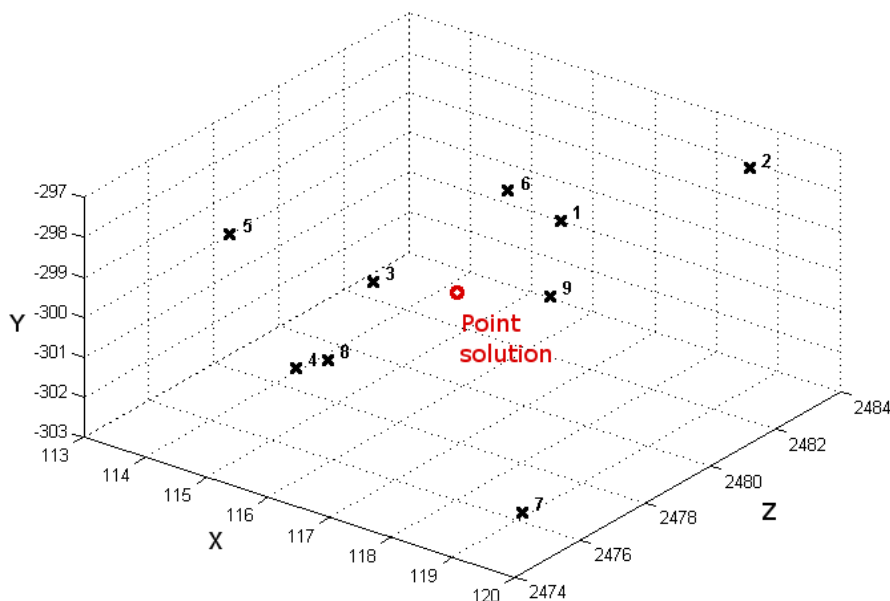


Figure V-11. Exemple de nuage des neuf projections du système pour un point donné. Les six premières solutions correspondent aux projections directes des appariements (points « gauche »), les trois dernières aux projections indirectes (points « droite »). Le point solution retenu est le centre du nuage.

Les points ainsi obtenus sont regroupés en fonction de la configuration de prise à laquelle ils correspondent ; de nouveaux nuages de points sont ainsi constitués. Le centre de ces nuages est pris comme référence pour caractériser la position du singe lors de la saisie de cet objet, tandis que la covariance des nuages va servir à évaluer la confiance que l'on peut avoir dans le positionnement de leurs centres (voir Figure V-12).

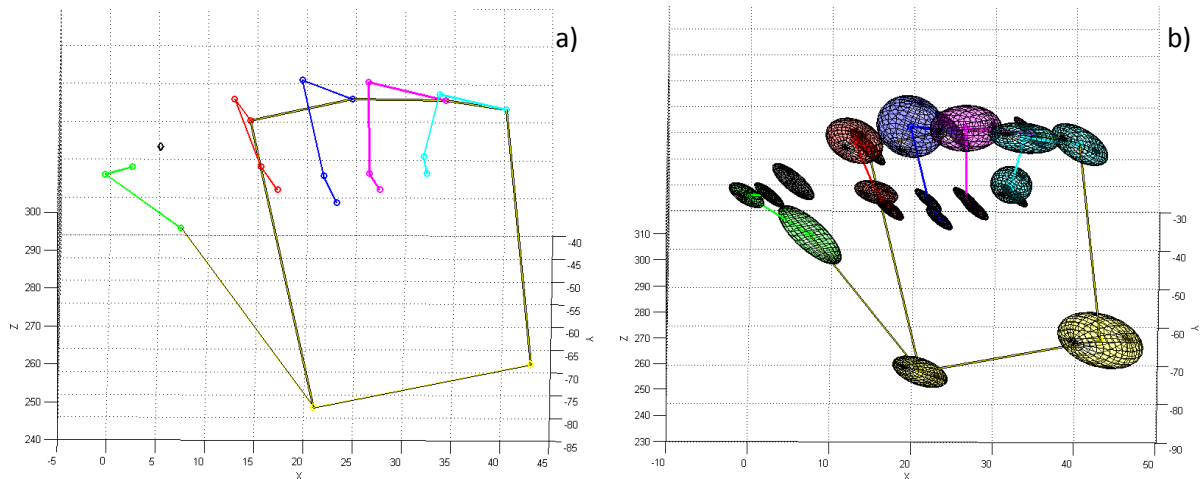


Figure V-12. Exemple de reconstruction brute correspondant à l'objet « Plaque ». a) Position moyenne. b) Indice de confiance des points, représenté par les ellipses de covariance des nuages qui leur correspondent.

Bien que relativement fidèles, ces résultats ne tiennent absolument pas compte des données anatomiques ; nous avons donc ajouté au processus de reconstruction un étage d'optimisation sous contrainte prenant comme consignes la longueur des segments naturels (voir section 2.d) ainsi que les limites articulaires des doigts. Nous avons volontairement limité cette optimisation aux angles des articulations IPP et IPD des doigts longs afin d'influencer le moins possible les données mesurées.

Le calcul de ces angles –comme ceux du reste de la main- se fait en trois temps :

- Premièrement nous déterminons l'orientation du repère de chaque point dans le repère caméra à travers la construction du plan qui le relie aux points auxquels il est rattaché, avec pour contraintes que l'axe X pointe vers l'articulation suivante et que l'axe Z porte la première rotation (pour les articulations à plus de deux dds, c'est l'axe Y qui porte la seconde) (voir Figure V-13)
- Ensuite, nous combinons cette orientation avec la position du point afin de construire la matrice de transformation homogène entre le repère caméra et celui considéré
- Enfin nous calculons la transformation entre chaque point et celui qui le suit sur la chaîne cinématique à laquelle il appartient (une par doigt). De ces matrices nous pouvons extraire directement les angles de rotation.

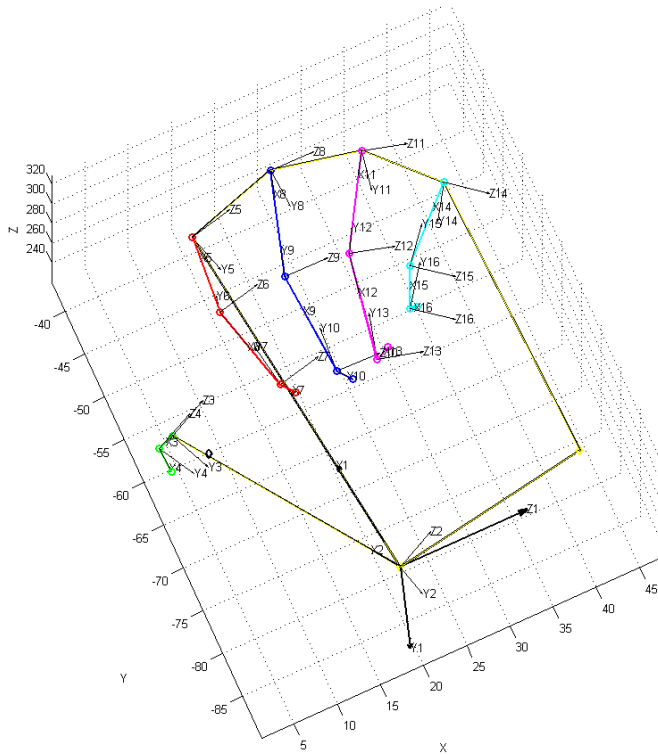


Figure V-13. Formalisme adopté dans la reconstruction de la main du singe (configuration correspondant à l'objet « Plaque », l'objet lui-même n'étant pas affiché afin de ne pas gêner la lisibilité). A chaque point est attribué un repère, numéroté de 0 à 16 ; le repère 0 est celui de la caméra HL, le numéro 1 représente l'orientation de la paume, etc. Pour chaque repère, l'axe X est orienté vers le point suivant, l'axe Z est celui qui porte le premier ddl et l'axe Y le second ddl, le cas échéant.

i) Prise en compte des données anatomiques

Afin de limiter les phénomènes de dérive tels que la longueur anormale des segments des doigts ou l'utilisation de consignes angulaires non permises par la structure anatomique de la main nous avons implémenté dans notre chaîne de traitement un étage d'optimisation sous contrainte de ces paramètres. Ce traitement se déroule en trois étapes comme exposé ci-après.

Dans un premier temps nous déterminons le plan d'abduction/adduction de chaque doigt en faisant la somme pondérée de trois « plan locaux » (Figure V-14). Ces plans sont dessinés en utilisant trois des quatre points du doigt (MCP, IPP, IPD, extrémité) :

- Le premier plan utilise les points correspondant aux articulations MCP, IPP et IPD ;
- Le second utilise les points MCP, IPD et l'extrémité ;
- Le dernier utilise les points MCP, IPP et l'extrémité.

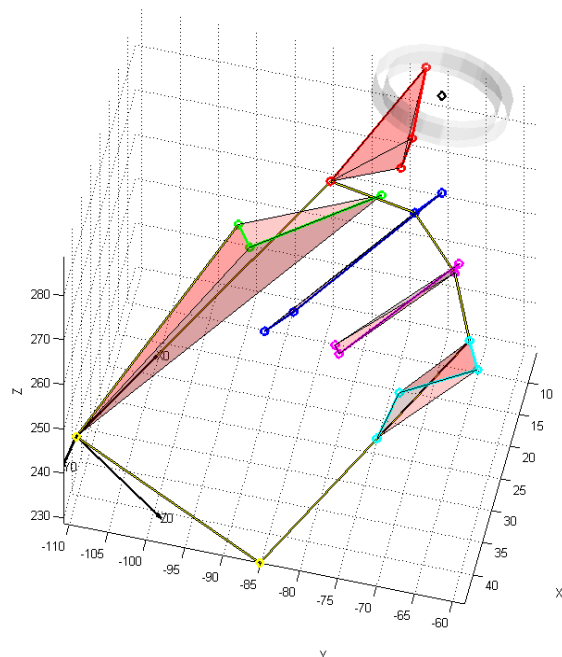


Figure V-14. Les trois « plans locaux » de chaque doigt servent à en déterminer le plan d'abduction/adduction (configuration de prise pour l'objet « Petit anneau »).

L'utilisation du point MCP pour chaque plan garantit que l'on reste dans une perspective d'abduction/adduction ; en effet, c'est le point dont la probabilité d'appartenance à ce plan est maximale. A chaque plan j est ensuite assigné un score en relation avec les ellipses de confiance de chaque point i qui le compose (sauf le point MCP puisqu'il intervient dans chacun des trois plans). Ce score correspond à l'inverse du volume de l'ellipse d'erreur autour du point (voir Figure V-12,b).

$$(Équation V-14) \quad Score_i = \frac{3}{4\pi abc}$$

avec a, b, c les valeurs propres de la matrice de covariance du point considéré (représentées par les axes de l'ellipse). Soit ensuite le score du plan j , normalisé

$$(Équation V-15) \quad Score_j = \frac{\sum_{i=1}^2 Score_i}{2 \sum_{i=1}^3 Score_i}$$

Et enfin le calcul du plan d'abduction/adduction final :

$$(Équation V-16) \quad Plan_{abd/add} = \frac{\sum_{j=1}^3 Score_j * Plan_j}{3}$$

Une fois ce plan exprimé, nous pouvons projeter les trois points composant le doigt (tous sauf le MCP) à sa surface (Figure V-15). Pour ce faire nous exprimons la position de ces points dans le repère lié au MCP puis nous effectuons une multiplication par les composantes X et Y du nouveau plan sur ces points par relation d'orthogonalité.

Comme cette relation ne conserve ni les angles relatifs ni les distances entre les points nous introduisons ici une erreur par rapport aux points mesurés et reconstruits ; cependant ces paramètres vont être corrigés lors de la prochaine et dernière étape.

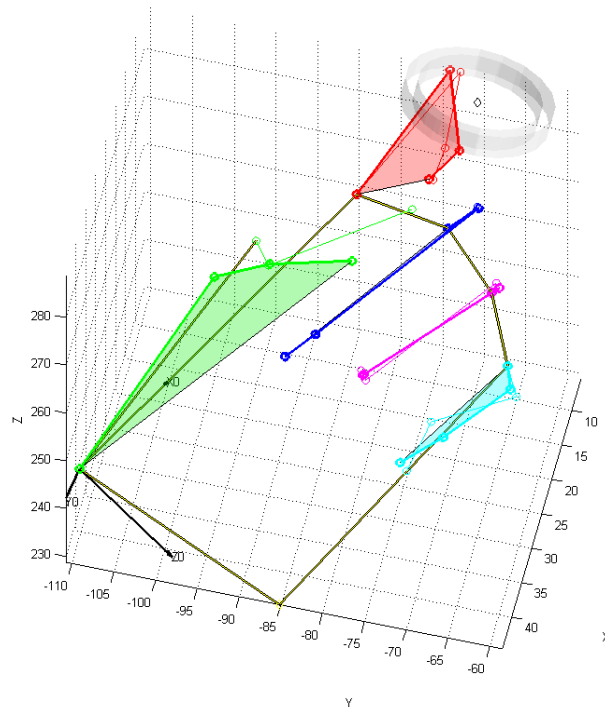


Figure V-15. Projection des points sur les plans d'abduction/adduction (configuration de prise pour l'objet « Petit anneau »). Les points et lignes fins constituent la configuration d'origine, tandis que ceux en gras sont leurs projections. On peut constater que dans certains cas la différence est très faible (majeur).

Maintenant que nos points appartiennent tous au même plan, nous pouvons corriger leurs distances et angles relatifs afin qu'ils correspondent à la réalité biologique. Nous nous appuyons pour cela sur le scan d'un bras de singe (présenté à la section 3b).1a)i) qui nous donne de manière très précise la taille des différents segments. Nous retrouvons ici encore la problématique des mesures de surface à mettre en relation avec la structure cinématique de la main ; cette fois nous n'avons pu développer de modèle standard de référence du fait de la pauvreté de la littérature à ce sujet. Nous devons donc nous contenter d'utiliser un seul sujet, pris comme « référence parfaite ».

Nous pouvons ainsi corriger les positions des points intermédiaires (IPP et IPD) de manière à correspondre au mieux à la réalité terrain. Ceci est effectué par la minimisation d'une fonction de distance (entre le point origine et le point calculé) au sens des moindres carrés (Équation V-17).

(Équation V-17)
$$\sum_{i=1}^4 (x(i)_{original} - x(i)_{calculé})^2$$

Avec $x(i)$ le vecteur coordonnées du point i

$l(k)$ la longueur du segment k entre deux points successifs

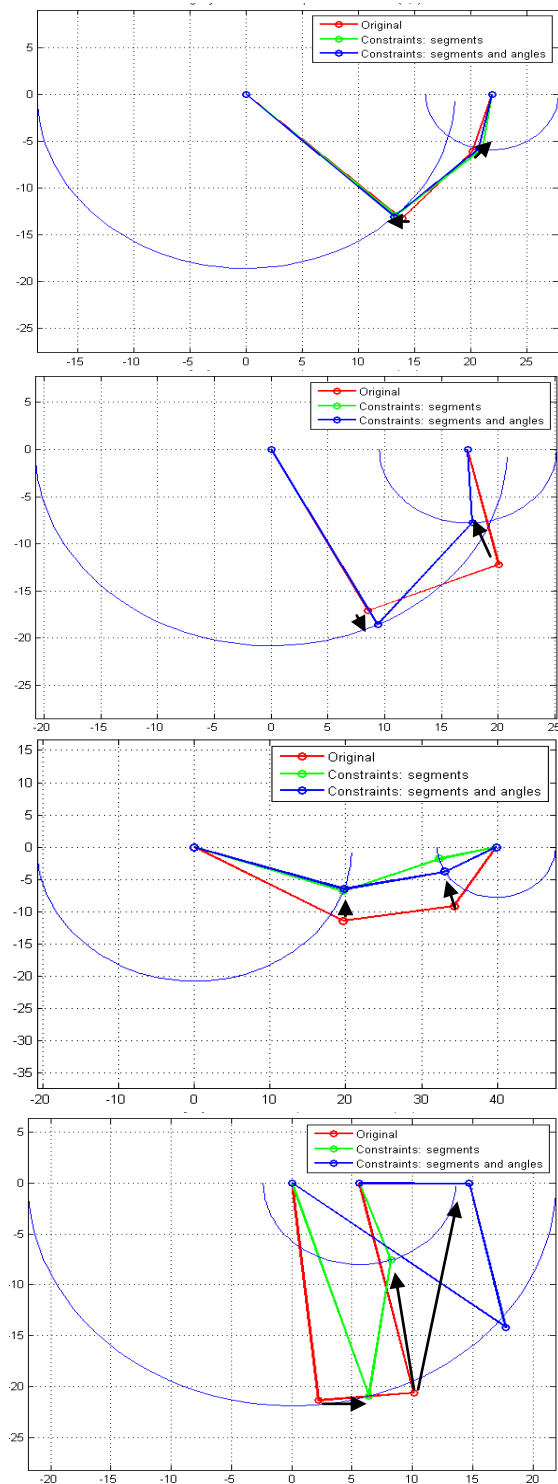
Et les contraintes :

$$\begin{cases} \forall k \in [1,3], (l(k)_{anatomique} - l(k)_{calculée})^2 = 0 \\ \frac{\pi}{3} < \theta_{IPP} < \pi \\ \frac{\pi}{2} < \theta_{IPD} < \pi \end{cases}$$

La Figure V-16 montre quelques exemples de l'influence de cette technique sur les résultats obtenus. On peut y voir que la solution que l'on cherche à obtenir peut être matérialisée par la somme des distances à deux cercles ; le premier est centré sur le point MCP et a pour rayon la distance entre les points MCP et IPP, tandis que le deuxième est centré sur l'extrémité du doigt et a pour rayon la distance ente celui-ci et le point IPD (arcs de cercle marqués en bleu).

Comme le système considéré est redondant il possède une infinité de solutions ; en ce cas la recherche d'une distance minimum au sens des moindres carrés est adéquate en ce qu'elle donne une solution rapide et unique, tout en ne modifiant qu'au minimum les données originales.

Une faiblesse de cette technique est de devoir s'appuyer sur les points MCP et les extrémités comme références (leurs positions ne sont pas modifiées et sont donc considérées parfaitement reconstruites) ; cependant ce problème est pondéré par le fait que de tous les points reconstruits les MCP sont parmi ceux qui sont vus le plus souvent (et sont donc par conséquent assez bien définis), et que les extrémités des doigts ne sauraient être déplacées sans modifier considérablement la configuration de prise.



a)

Valeurs angulaires (en °)	IPP	IPD
reconstruite	92	25
contrainte = segments	86	39
contrainte = segments + angles	88	34

b)

Valeurs angulaires (en °)	IPP	IPD
reconstruite	86	80
contrainte = segments	115	40
contrainte = segments + angles	115	40

c)

Valeurs angulaires (en °)	IPP	IPD
reconstruite	39	50
contrainte = segments	41	-8
contrainte = segments + angles	30	18

d)

Valeurs angulaires (en °)	IPP	IPD
reconstruite	89	97
contrainte = segments	155	27
contrainte = segments + angles	141	78

Figure V-16. Différents résultats de l'optimisation sous contrainte. Les traits rouges montrent les résultats de la reconstruction des points et leur projection sur le plan d'abduction/adduction ; les verts montrent le résultat de l'optimisation ayant pour seule contrainte la longueur des segments, tandis que les bleus prennent en compte à la fois ces longueurs et les limites angulaires. a) montre une faible influence de l'optimisation, les données originales étant très proches de la solution anatomique. b) montre une contribution plus importante. c) montre l'importance de la prise en compte des butées articulaires dans la recherche de solution, celle donnée par l'optimisation sur les longueurs des segments seule n'étant pas satisfaisante. d) ici les données originales étaient très éloignées de la solution anatomique, et on voit aussi l'influence des butées articulaires sur celle-ci.

3. Méthodes : Modèle anatomique

Le deuxième volet du travail présenté dans ce chapitre a trait à la modélisation du bras gauche d'un singe (*macaca mulatta*). Le but de ce modèle est de pouvoir reproduire et évaluer les mouvements effectués par l'animal dans un site expérimental virtuel (voir Figure V-5), et ce du mieux possible. Pour cela nous avons choisi de partir de la réalité anatomique et de construire le modèle pièce par pièce.

a) **Faisabilité : premier simulateur avec une main humaine**

Nous avons choisi de développer notre simulateur sur des plateformes *open source* (Osirix et Blender) afin d'en faciliter la diffusion. En effet, ce genre de travaux avait jusqu'alors été réalisé sur des plateformes propriétaires, dédiées pour la plupart à ces applications et non *open source* (ElKoura et Singh 2003, Sueda, Kaufman et Pai 2008, Chalfoun, et al., Savescu 2006). Nous avons ainsi testé notre chaîne de construction du modèle avec une main humaine, en respectant toutes les étapes présentées ci-après et en ajoutant à notre main une couverture partielle par sa « peau », aux endroits destinés au contact.

Nous avons même pu aller plus loin grâce au moteur physique du logiciel, qui nous a permis de gérer les collisions et les frottements lors de la saisie d'objets. Dans cette simulation, trois mouvements-clefs ont été programmés et peuvent être déclenchés par l'utilisateur : un crochet avec l'index, une prise en force et une prise de précision (voir Figure V-17). Ces prises ont été créées à partir de deux positions statiques entre lesquelles le logiciel extrapole les trajectoires des éléments en mouvement.

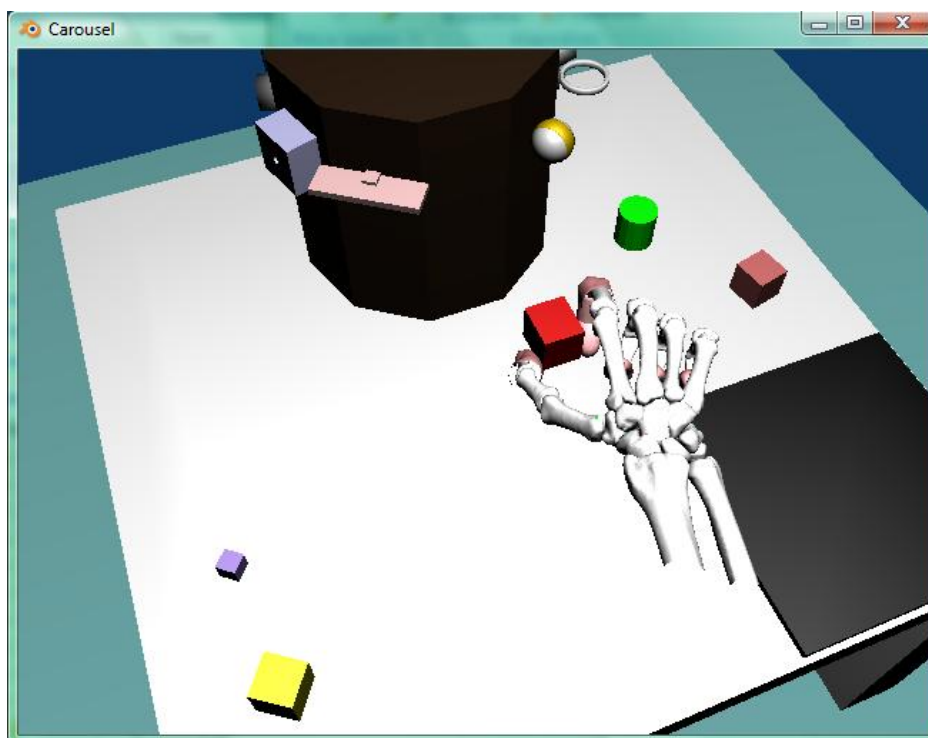


Figure V-17. Simulateur du setup utilisant une main humaine et intégrant les lois physiques. L'objet, attaché au carousel par un ressort, est saisi entre les doigts et retournera à sa position initiale si ceux-ci relâchent la prise ou si la main s'éloigne trop du carousel (lorsque la tension du ressort dépasse la friction des doigts sur l'objet).

b) Méthode de reconstruction

i) CT scan des données anatomiques

Nous disposons d'un bras gauche de singe (voir Figure V-18) que nous avons scanné par tranches de 750 μ m d'épaisseur (résolution du voxel : 0,1 x 0,1 x 0,75mm) à l'aide d'un appareil de tomodensitométrie (*Scan CT*). Nous avons obtenu ainsi 452 coupes à partir desquelles nous avons construit un premier modèle 3d sous le logiciel Osirix (Ratib, Rosset et Heuberger). Ce modèle nous a permis de valider la qualité des données avant d'aller plus loin, et a servi de base pour la segmentation.



Figure V-18. Le bras gauche d'un macaque et sa reconstruction 3d à partir d'images médicales. Malgré la relative petite taille du modèle d'origine sa simulation s'avère être de bonne qualité.

ii) Segmentation

Afin de générer un modèle fidèle aux mouvements de l'original, chaque os du bras et de la main a été isolé des autres, exception faite de ceux du poignet qui ont été considérés comme un ensemble. Ce traitement nous a donné 23 solides qui ont ensuite été exportés vers le logiciel d'animation Blender (Roosendaal et Foundation. 2007).

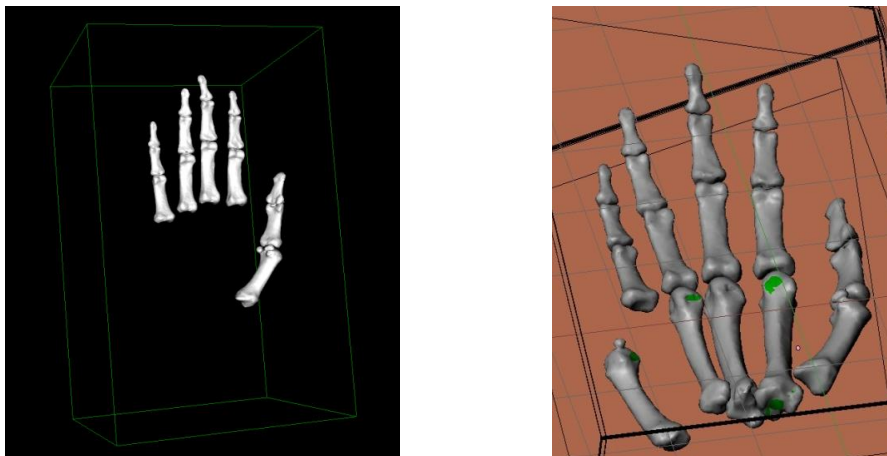


Figure V-19. La segmentation des différents os d'une main humaine sous Osirix, et sa reconstruction dans le logiciel Blender. Les zones vertes sont celles qui ont été remodelées suite à une déperdition des données.

iii) Reconstruction/animation

Une simple importation dans Blender des données générées par Osirix n'était pas suffisante ; en effet ces données étaient de résolution maximale et par conséquent très lourdes à utiliser. Nous avons donc dans un premier temps réduit leur résolution en effectuant des fusions de points et faces de 75%. Ce ratio peut sembler élevé mais s'est avéré le meilleur compromis entre la taille des différents objets (au sens informatique du terme) et leur fidélité aux données initiales.

Une fois cette réduction effectuée il a fallu corriger les erreurs de reconstruction ; en effet, nos différents solides pouvaient présenter de manière locale plusieurs types de problème :

- Erreurs anatomiques (trous ou protubérance appartenant à d'autres os), dues à une segmentation imprécise (Figure V-19)
- Points ou surfaces surnuméraires (typiquement, à l'intérieur des modèles), à cause d'un problème de conversion entre les logiciels
- Mauvaise orientation de faces, due soit à la conversion, soit à la réduction du modèle.

Ensuite nous avons implémenté une armature sur notre modèle, afin de pouvoir contrôler ses différents segments. Cette armature est un outil hérité directement du domaine de l'animation, que ce soit pour un film ou un jeu ; elle permet d'animer un modèle en lui appliquant des déformations locales et même de le soumettre aux lois physiques quand celles-ci sont prises en compte par la simulation.

Dans notre cas nous avons dans un premier temps déterminé anatomiquement les centres articulaires entre les différents éléments, puis nous avons tirés entre chaque paire de centres des « os virtuels ». Ces os passent à l'intérieur des « os réels » et ces derniers leur sont asservis ; ainsi, si l'on bouge un os virtuel, l'os réel qui lui correspond bouge en conséquence. Les os virtuels sont orientés de manière à correspondre au modèle établi sous Matlab, et leurs rotations relatives sont soumises aux butées anatomiques (voir Figure V-20).

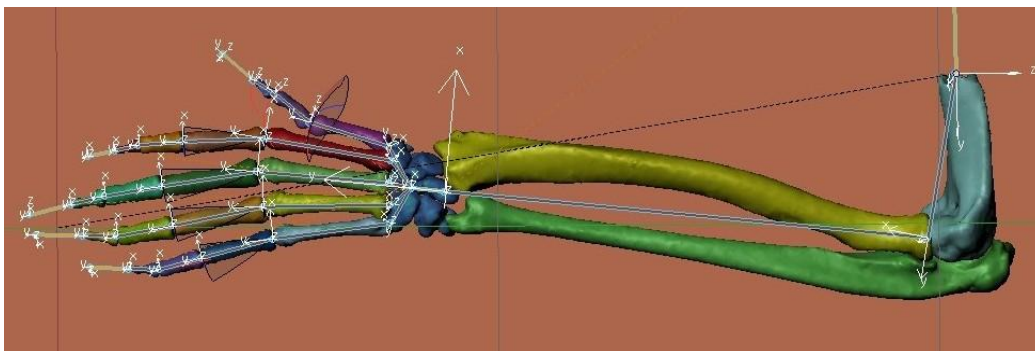


Figure V-20. Le modèle de bras complet reconstruit sous Blender. A chaque solide est assignée une couleur afin de faciliter le travail de correction et le positionnement de l'armature. L'armature est mise en place ; à chaque solide correspond un « os virtuel » auquel il est rattaché. Ceux-ci sont orientés de manière à faciliter leur contrôle (un ddl par axe) et sont limités dans leurs mouvements (les enveloppes de travail sont ici visibles pour les premières phalanges de chaque doigt). Les segments qui dépassent des extrémités du modèles sont des « ancrs » qui servent à le contrôler et n'ont pas de réalité biologique.

Nous avons ainsi apporté un soin particulier à reproduire la structure cinématique du bras du singe, et ce même pour les articulations ayant peu d'implication dans la configuration de prise finale (voir Figure V-21).

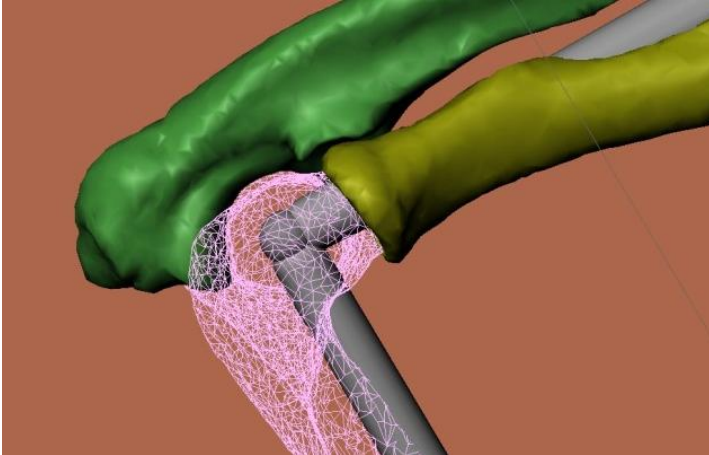


Figure V-21. Détail de l'articulation du coude. Nous avons fait en sorte que les trois os puissent coulisser les uns sur les autres de manière similaire au modèle biologique, et ce malgré l'utilisation d'un centre articulaire. L'armature apparaît en gris, l'humérus en rose, le radius en jaune et l'ulna en vert.

Cette étape est très importante puisqu'en plus d'avoir un impact direct sur la qualité des configurations de prise que nous allons reproduire elle nous a aussi permis de mesurer la taille des différents segments qui a été utilisée ensuite dans l'étape d'optimisation (voir Tableau V-2 et la section 2.d). Ces dimensions ont été mesurées en calculant la distance euclidienne entre chaque paire de centres correspondant à un os virtuel ; le logiciel Blender n'utilisant *a priori* pas de système métrique autre que le sien propre nous avons vérifié la cohérence de ces mesures en testant quelques-unes sur les données originales dans Osirix (voir Figure V-22). Ces mesures nous ont permis d'évaluer la fiabilité de notre reconstruction avant l'étape d'optimisation (Tableau V-3).



Figure V-22. Vérification de la validité des mesures effectuées dans Blender par recouplement avec les données originales. Bien que sûre, cette méthode est bien moins aisée à mettre en place car accessible uniquement sur les vues 2d du logiciel Osirix et non une vue 3d générale.

Tableau V-2. Longueur des segments d'après leur reconstruction dans Blender. Chaque longueur est calculée par distance euclidienne entre deux points successifs.

*** A cette longueur doit être ajoutée la distance entre le processus styloïde radial et l'articulation carpométacarpienne, puisque c'est ce premier qui est utilisé comme point de référence lors de l'analyse des vidéos. Nous avons obtenu une longueur de 39,5mm en tout.*

Elément principal	Elément secondaire	Coord. X	Coord. Y	Coord. Z	Longueur du segment (en mm)
Origine		0	0	0	0
Bras		-0,369	0,065	-0,048	037,8
Avant-bras		-0,259	1,161	-0,053	110,2
Pouce	TM	-0,158	1,287	-0,08	016,4
	MP	-0,103	1,464	-0,079	018,5**
	IPD	-0,038	1,544	-0,057	010,5
	Extrémité	-0,008	1,591	-0,074	005,8
Index	CMC	-0,189	1,282	-0,033	014,1
	MCP	-0,138	1,568	-0,021	029,1
	IPP	-0,144	1,754	-0,024	018,6
	IPD	-0,151	1,852	-0,06	010,5
	Extrémité	-0,163	1,907	-0,078	005,9
Majeur	CMC	-0,24	1,284	-0,032	012,6
	MCP	-0,212	1,585	-0,032	030,2
	IPP	-0,244	1,801	-0,048	021,9
	IPD	-0,266	1,928	-0,089	013,5
	Extrémité	-0,284	2,006	-0,093	008,0
Annulaire	CMC	-0,288	1,283	-0,035	012,7
	MCP	-0,292	1,572	-0,054	029,0
	IPP	-0,333	1,776	-0,065	020,8
	IPD	-0,356	1,901	-0,113	013,6
	Extrémité	-0,354	1,979	-0,113	007,8
Auriculaire	CMC	-0,33	1,282	-0,053	014,0
	MCP	-0,363	1,549	-0,067	026,9
	IPP	-0,406	1,711	-0,076	016,8
	IPD	-0,432	1,806	-0,115	010,6
	Extrémité	-0,431	1,874	-0,14	007,2

Chapitre V. Modélisation du geste de saisie chez le singe à partir de vidéos

Tableau V-3. Longueur des segments avant optimisation sous contrainte (en mm). Les trois segments de chaque doigt (proximal, intermédiaire et distal) sont mesurés et comparés à leur équivalent déterminé anatomiquement (Tableau V-2) en fonction des objets. Les erreurs supérieures à 10mm sont indiquées en rouge.

Petit anneau						Erreur/anatomie				
	Pouce	Index	Majeur	Annul.	Auric.	Pouce	Index	Majeur	Annul.	Auric.
Prox.	40,11	24,58	23,30	27,50	22,11	0,61	5,98	1,40	6,70	5,31
Int.	12,93	11,44	24,27	20,05	10,75	2,43	0,94	10,77	6,45	0,15
Dist.	18,01	7,99	7,55	9,51	9,78	12,21	2,09	0,45	1,71	2,58
Grand anneau						Erreur/anatomie				
	Pouce	Index	Majeur	Annul.	Auric.	Pouce	Index	Majeur	Annul.	Auric.
Prox.	34,68	24,11	17,11	24,20	16,07	4,82	5,51	4,79	3,40	0,73
Int.	13,71	23,55	15,17	11,57	10,20	3,21	13,05	1,67	2,03	0,40
Dist.	11,41	13,09	9,58	8,88	9,33	5,61	7,19	1,58	1,08	2,13
Sphère						Erreur/anatomie				
	Pouce	Index	Majeur	Annul.	Auric.	Pouce	Index	Majeur	Annul.	Auric.
Prox.	32,28	16,49	27,66	25,42	20,18	7,22	2,11	5,76	4,62	3,38
Int.	17,08	11,54	14,73	17,53	8,74	6,58	1,04	1,23	3,93	1,86
Dist.	10,78	8,50	13,53	12,12	8,15	4,98	2,60	5,53	4,32	0,95
Cube						Erreur/anatomie				
	Pouce	Index	Majeur	Annul.	Auric.	Pouce	Index	Majeur	Annul.	Auric.
Prox.	28,56	10,09	21,82	22,72	19,09	10,94	8,51	0,08	1,92	2,29
Int.	17,81	16,77	16,05	14,89	10,37	7,31	6,27	2,55	1,29	0,23
Dist.	12,54	7,39	11,42	10,86	9,06	6,74	1,49	3,42	3,06	1,86
Plaque						Erreur/anatomie				
	Pouce	Index	Majeur	Annul.	Auric.	Pouce	Index	Majeur	Annul.	Auric.
Prox.	33,93	23,79	25,51	22,73	14,08	5,57	5,19	3,61	1,93	2,72
Int.	13,34	11,81	16,57	15,49	11,23	2,84	1,31	3,07	1,89	0,63
Dist.	11,63	6,05	7,30	6,93	5,81	5,83	0,15	0,70	0,87	1,39
Cube de précision						Erreur/anatomie				
	Pouce	Index	Majeur	Annul.	Auric.	Pouce	Index	Majeur	Annul.	Auric.
Prox.	39,98	19,25	21,67	19,10	12,42	0,48	0,65	0,23	1,70	4,38
Int.	16,20	9,52	11,92	12,53	12,20	5,70	0,98	1,58	1,07	1,60
Dist.	8,05	6,38	22,65	12,51	10,00	2,25	0,48	14,65	4,71	2,80

4. Résultats

a) Extraction de configurations de prise des vidéos

Les premiers résultats sont basés sur l'extraction de 42 positions de prises réparties de manière assez homogène entre les objets :

- Petit anneau : 7
- Grand anneau : 8
- Sphère : 6
- Cube : 7
- Plaque : 8
- Cône : 6

Ces configurations de prises ont été reconstruites avec plus ou moins de succès en fonction de la visibilité des points de référence ; pour certaines il manque un ou plusieurs doigts, difficiles à distinguer sur les images. Nous ne présenterons ici que deux exemples de reconstruction – un complet et l'autre non (Figure V-24 et Figure V-25), le reste des résultats étant présenté en Annexe 5.

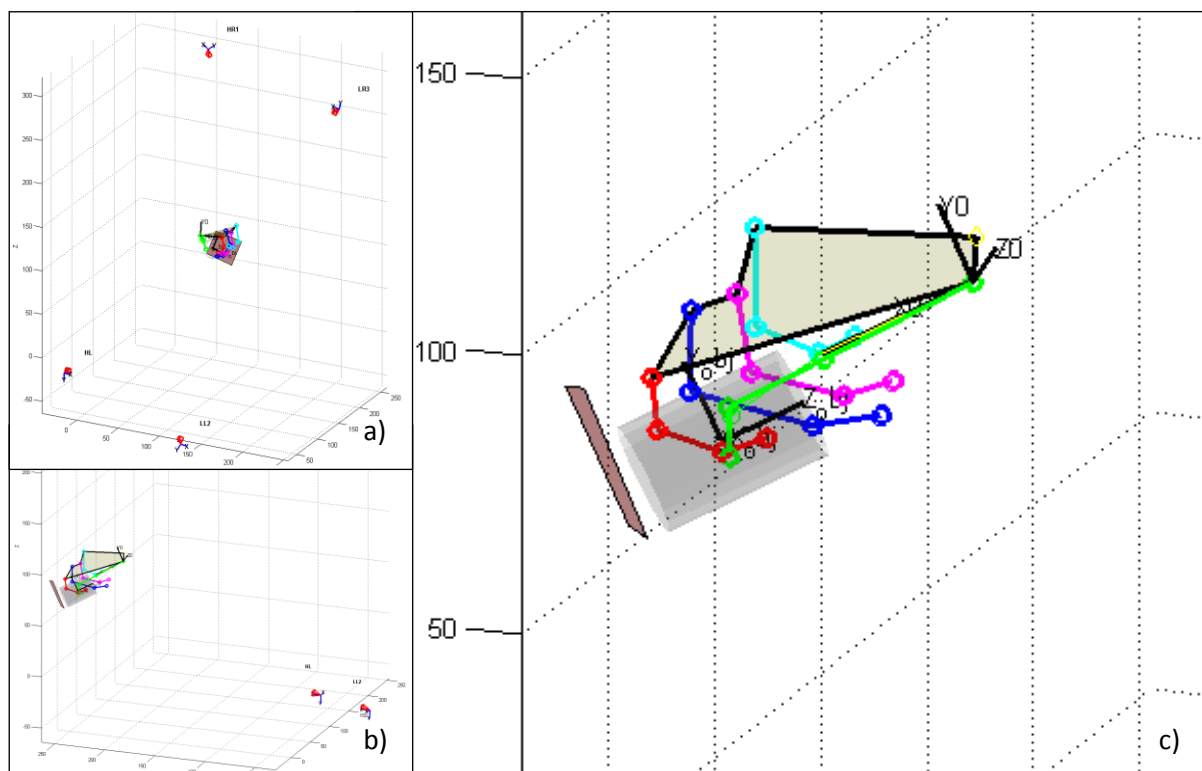


Figure V-23 Le site expérimental esquissé sous Matlab, pour une configuration de prise de l'objet « Cône ». Le plan rouge représente la surface du carousel, le bloc gris translucide l'objet à saisir. a) et b) vue d'ensemble, on peut distinguer les quatre caméras. c) détail de la prise.

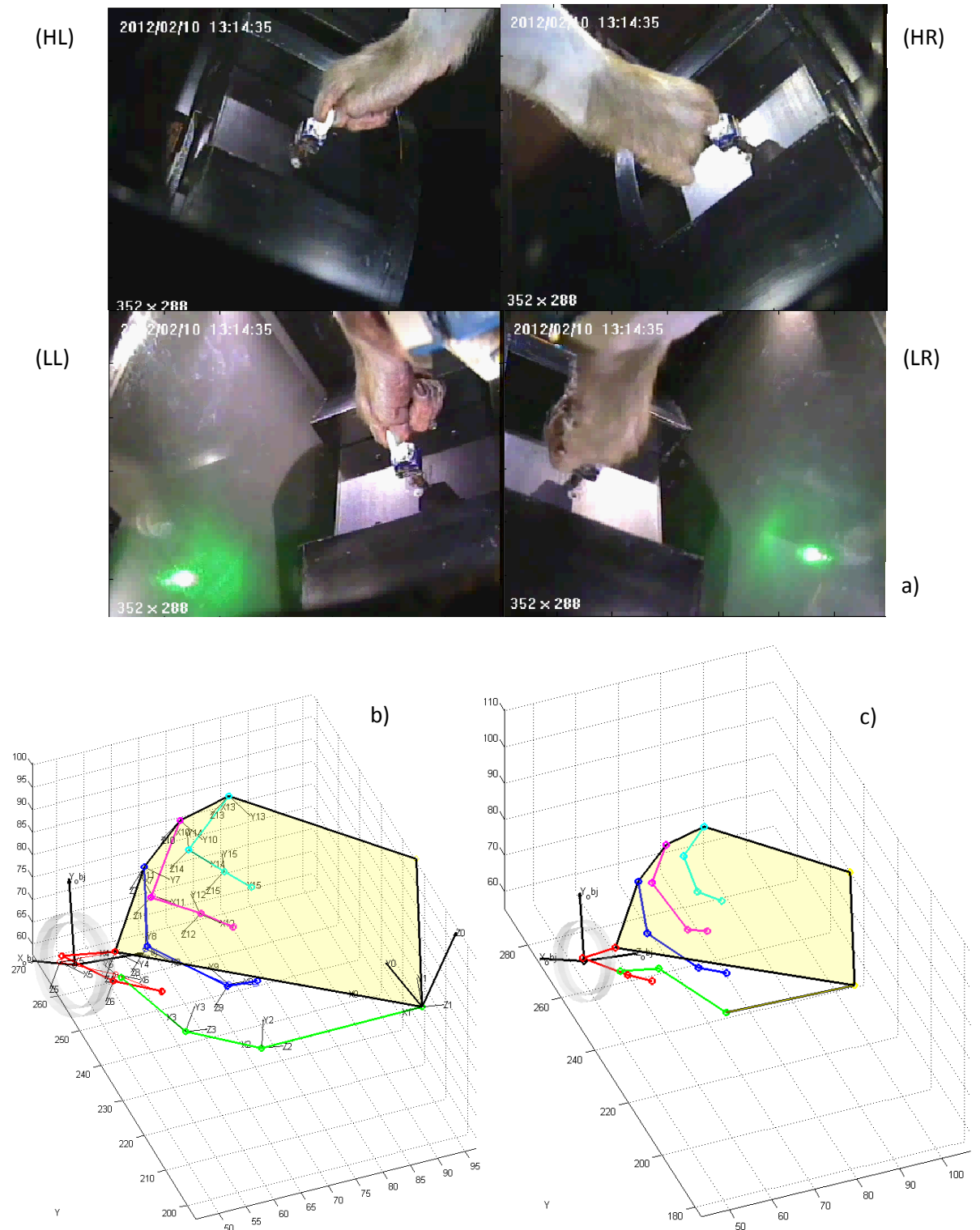


Figure V-24. Exemple de données totalement reconstruites : le petit anneau. On constate ici que les vues ont permis de reconstruire la main entière, chaque point de référence étant visible par au moins deux caméras.

a) Les quatre points de vue des caméras. b) La reconstruction de la configuration de prise après projection des points sur les plans d'abduction/adduction. c) La configuration finale, après l'étape d'optimisation ; on peut notamment voir l'influence de celle-ci sur les quatrième et cinquième doigts.

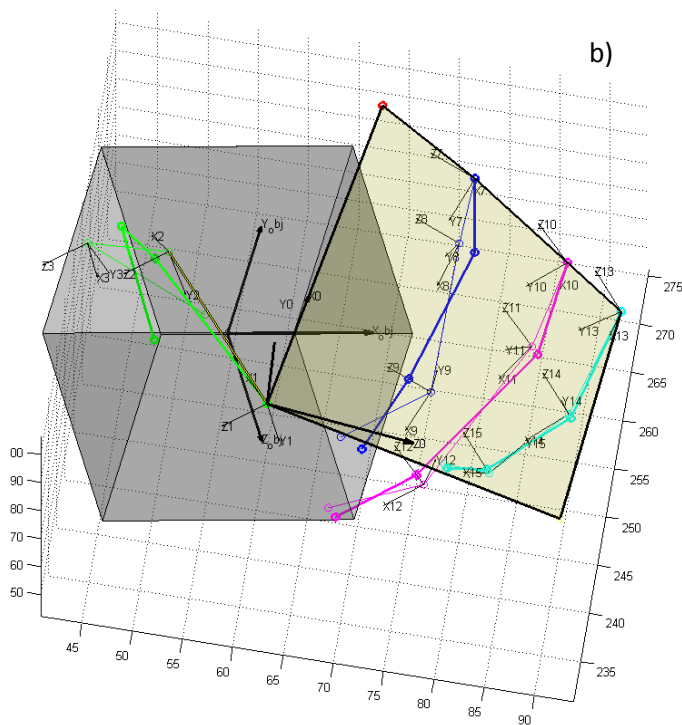


Figure V-25. Exemple de données partiellement reconstruites : le cube. Ici seul le point MCP de l'index a pu être reconstruit, le reste du doigt étant totalement occulté par l'objet et le majeur. En conséquence le traitement s'est arrêté avant l'optimisation, après la projection des points (b).

b) Estimation des points manquants

De par les difficultés de reconstruction liées aux occultations il a été proposé de faire estimer à l'expérimentateur la position des points non visibles sur les images. Bien qu'ajoutant une potentielle erreur au processus et nous éloignant d'autant de la réalité terrain, cette tentative d'amélioration a permis d'obtenir des résultats acceptables. De plus, cette erreur est directement mesurable via le calcul des scores de fidélité liés aux points.

Nous avons appliqué cette approche à un deuxième set de données comptant en tout 39 essais, répartis de la sorte :

- Petit anneau : 7
- Grand anneau : 6
- Sphère : 7
- Cube : 6
- Plaque : 9
- Cube de précision : 3

La Figure V-26 montre les configurations de prise reconstruites pour chaque objet à partir des positions moyennes des points de référence pour ces objets.

Les Tableau V-4 et Tableau V-5 montrent quant à eux la dispersion des points en fonction des objets ; uniquement les points terminaux et la position de l'objet d'abord, puis la somme de la dispersion des points pour chaque doigt. Ces dispersions sont calculées en faisant la valeur moyenne des valeurs propres de la matrice de covariance de chaque point, ce qui reviendrait à transformer l'ellipse d'erreur en une sphère ayant cette valeur pour rayon.

Tableau V-4. Dispersion des points terminaux des doigts et de la position de l'objet (en mm).

	Pouce	Index	Majeur	Annulaire	Auriculaire	Objet
Petit anneau	25,55	17,22	9,99	12,25	15,22	11,60
Grand anneau	4,35	10,10	3,65	7,73	11,58	5,46
Sphère	11,06	6,18	8,59	22,37	12,34	5,92
Cube	6,96	4,66	11,87	10,06	12,02	5,02
Plaque	10,53	5,53	5,66	4,79	8,75	7,57
Cube de précision	21,04	13,76	9,09	7,72	9,62	6,56

Tableau V-5. Somme des dispersions par doigt en fonction du type d'objet. Les points considérés sont les points MCP, IPP, IPD et l'extrémité pour les doigts longs, et seulement le MP, l'IPD et l'extrémité pour le pouce.

	Pouce	Index	Majeur	Annulaire	Auriculaire	Objet
Petit anneau	13,76	9,24	11,50	9,27	9,26	11,60
Grand anneau	4,16	9,49	6,23	6,25	5,84	5,46
Sphère	6,63	6,04	9,47	11,38	9,17	5,92
Cube	7,54	9,53	7,80	12,37	9,91	5,02
Plaque	6,57	6,88	7,32	6,45	7,69	7,57
Cube de précision	10,56	7,00	11,38	7,11	6,15	6,56

c) Extraction des angles articulaires

La reconstruction des configurations de prise étant désormais complète, nous pouvons en extraire les angles articulaires correspondants. Pour cela nous utilisons le même processus que celui expliqué à la section 2. d).iii), en décomposant la matrice de rotation du repère lié à chaque articulation en trois angles d'Euler :

- α suivant l'axe X pour la torsion
- β suivant l'axe Y pour l'abduction/adduction
- θ suivant l'axe Z pour la flexion/extension

Si cette méthode nous donne de bons résultats pour β et θ , la torsion α exprimée aux points MCP et TM est indésirable et n'a rien d'anatomiquement correct (Tableau V-6). Cependant, si l'on fait abstraction de ce problème nous pouvons transférer les angles ainsi extraits au modèle Blender afin de générer des configurations de prises dans l'environnement virtuel (voir Figure V-26 à Figure V-28)

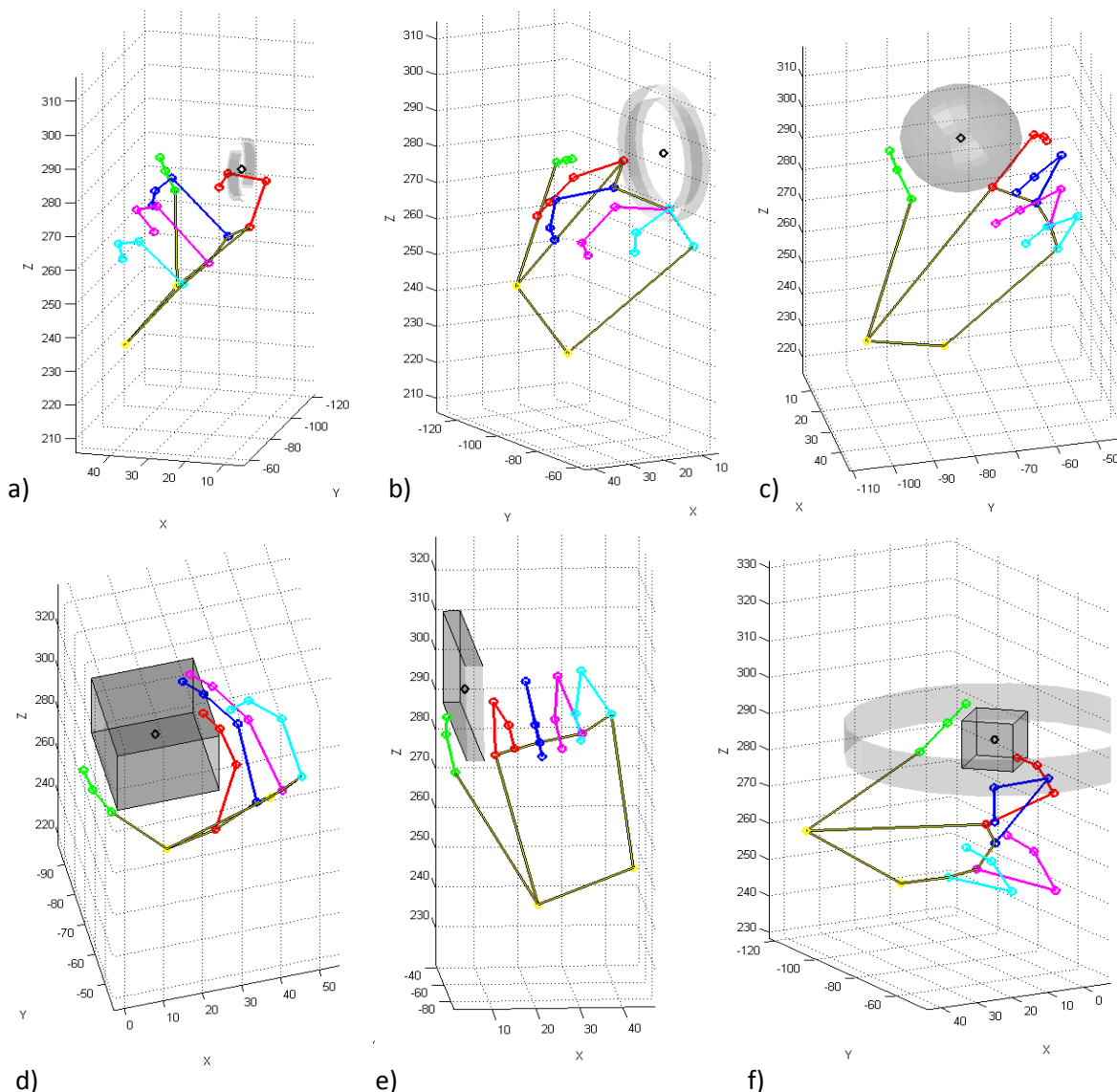
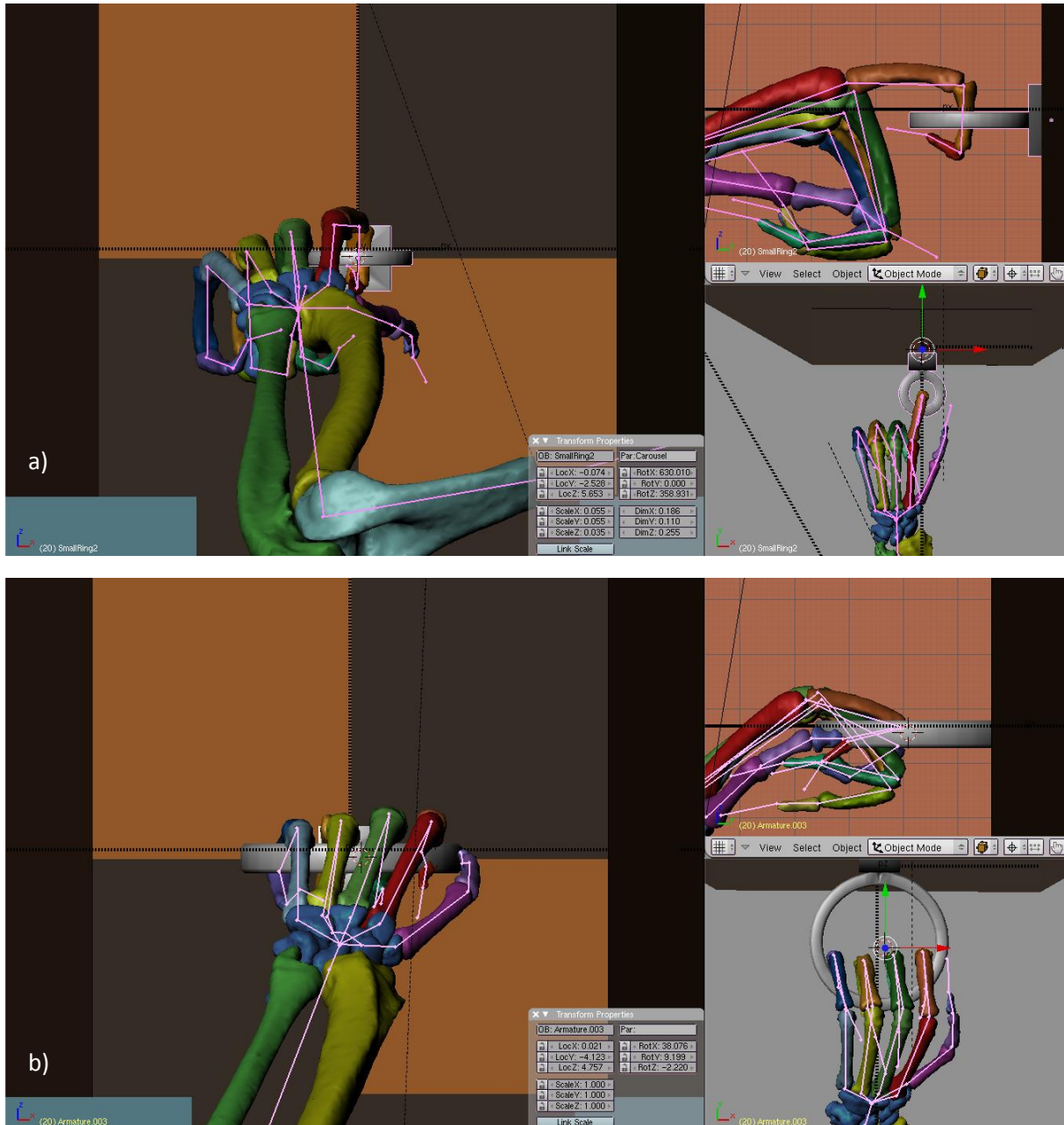


Figure V-26. Les configurations de prises moyennes, avec estimation des points non visibles. a) Petit anneau. b) Grand anneau. c) Sphère. d) Cube. e) Plaque. f) Cube de précision.

Chapitre V. Modélisation du geste de saisie chez le singe à partir de vidéos

Tableau V-6. Les angles articulaires des configurations de prise (en °).
 α : torsion du segment (suivant l'axe X). β : abduction/adduction (axe Y). θ : flexion/extension (axe Z)

			Petit anneau	Grand anneau	Sphère	Cube	Plaque	Cube de précision	
Pouce	TM	α	81,11	66,52	15,97	3,62	14,23	37,80	
		β	31,15	20,65	13,16	27,58	19,90	25,09	
		θ	1,45	0,69	16,84	22,43	15,31	23,03	
	MP	α	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		β	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		θ	17,69	55,86	60,39	22,19	43,53	17,72	
	IPD	α	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		β	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		θ	-2,71	-0,16	-5,42	54,16	25,28	-0,49	
Index	MCP	α	32,04	23,27	63,69	10,25	9,83	7,28	
		β	22,44	-6,50	8,60	-52,18	8,26	24,04	
		θ	10,27	107,25	33,23	52,53	84,60	11,55	
	IPP	α	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		β	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		θ	81,30	82,07	62,07	42,44	81,38	88,76	
	IPD	α	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		β	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		θ	89,30	2,68	9,90	22,94	59,41	34,50	
	Majeur	MCP	α	-6,45	18,32	43,37	7,72	1,69	-24,31
			β	-6,97	-0,59	-2,54	-21,84	-2,71	-3,54
			θ	86,74	102,04	61,83	76,15	83,94	47,70
IPP		α	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		β	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		θ	92,80	117,47	77,58	52,65	98,58	140,69	
IPD		α	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		β	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		θ	19,29	17,10	8,74	11,66	34,00	77,90	
Annul.	MCP	α	-8,74	12,36	38,09	5,49	-6,87	7,63	
		β	-11,77	-2,19	-14,69	-27,01	-13,73	-10,59	
		θ	86,89	93,25	73,75	91,22	81,64	-14,39	
	IPP	α	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		β	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		θ	81,58	86,31	77,43	29,56	95,00	115,43	
	IPD	α	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		β	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		θ	88,51	58,54	4,03	18,12	58,90	40,49	
Auric.	MCP	α	-1,35	-7,14	38,55	-1,86	-19,61	8,04	
		β	-8,39	-3,48	-19,33	-29,88	-32,76	-11,15	
		θ	80,49	60,19	63,70	72,39	79,20	-10,28	
	IPP	α	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		β	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		θ	83,65	106,02	75,62	56,86	119,98	116,91	
	IPD	α	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		β	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		θ	49,76	48,38	63,64	51,34	30,55	38,75	



Application des configurations de prise correspondant au **petit anneau** (a) et au **grand anneau** (b) dans la simulation du site expérimental, suivant trois points de vue. Seuls les angles de flexion/extension et d'abduction/adduction tirés du Tableau V-6 sont appliqués à l'armature (en rose). Les segments qui dépassent des extrémités du modèle sont des « ancrs » qui servent à le contrôler et n'ont pas de réalité biologique.

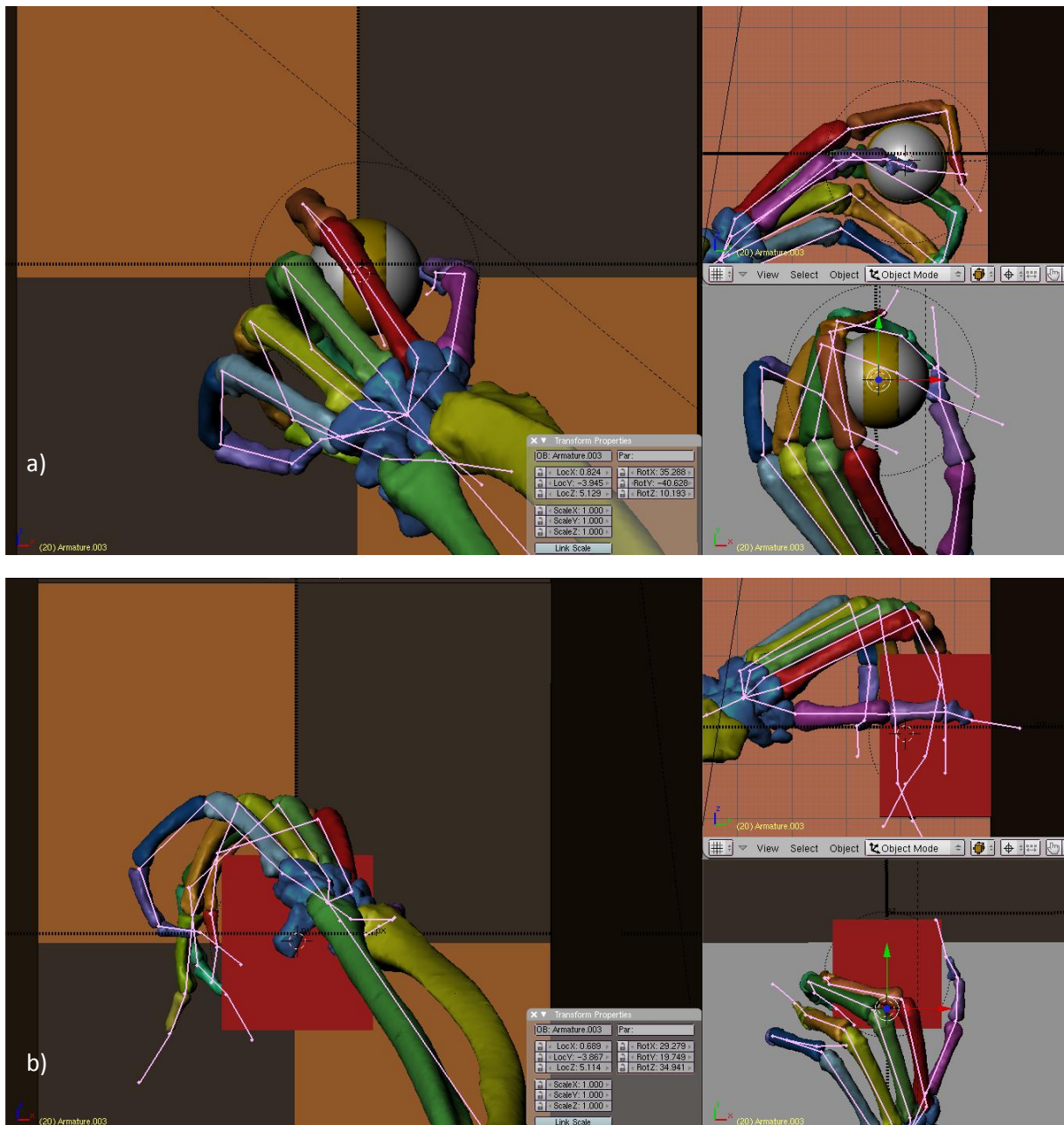


Figure V-27. Application des configurations de prise correspondant à la **sphère** (a) et au **cube** (b) dans la simulation du site expérimental, suivant trois points de vue. Seuls les angles de flexion/extension et d'abduction/adduction tirés du Tableau V-6 sont appliqués à l'armature (en rose). Les segments qui dépassent des extrémités du modèle sont des « ancrs » qui servent à le contrôler et n'ont pas de réalité biologique.

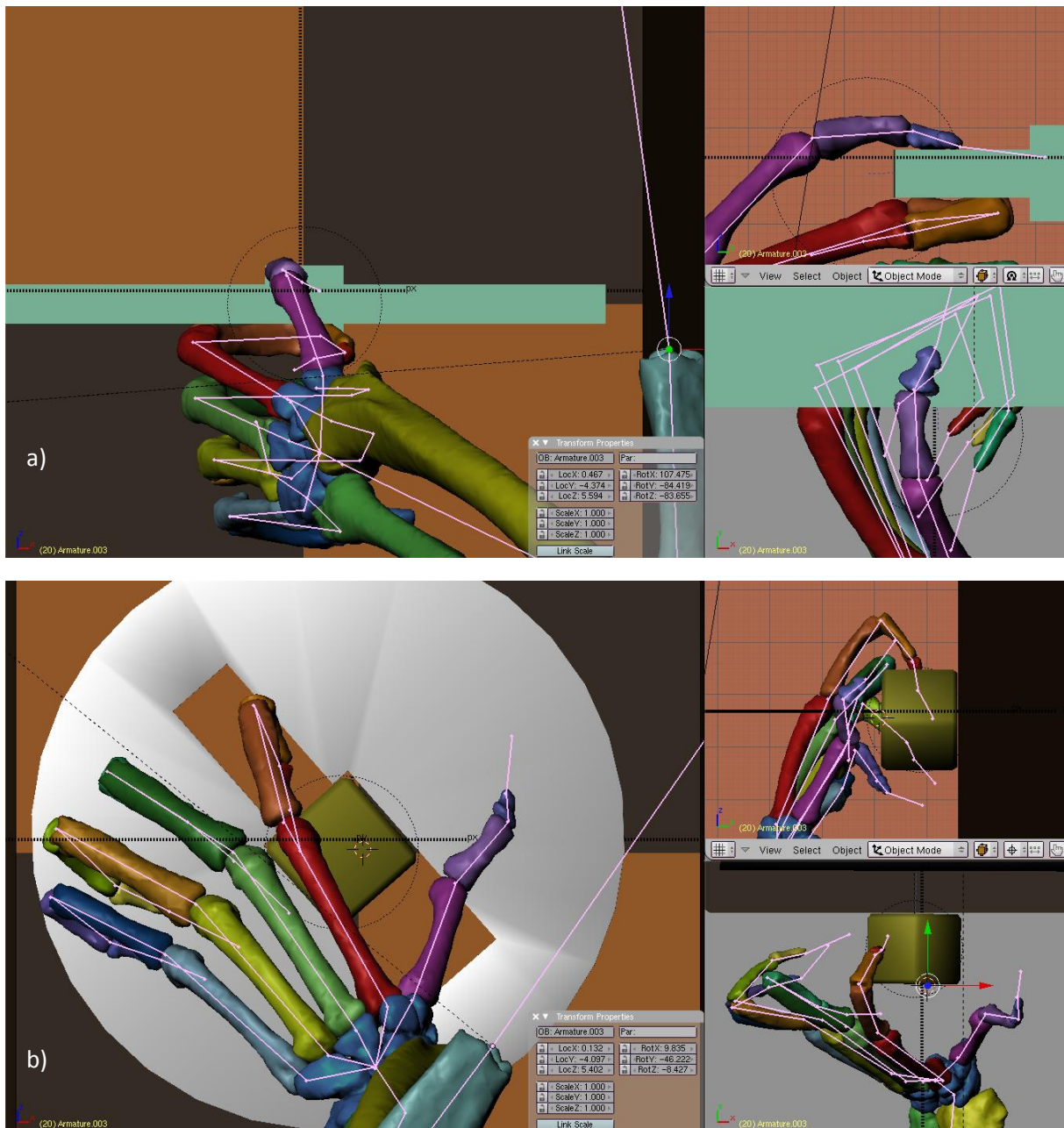


Figure V-28 Application des configurations de prise correspondant à la **plaque (a)** et au **cube de précision (b)** dans la simulation du site expérimental, suivant trois points de vue. Seuls les angles de flexion/extension et d'abduction/adduction tirés du Tableau V-6 sont appliqués à l'armature (en rose). Les segments qui dépassent des extrémités du modèle sont des « ancrs » qui servent à le contrôler et n'ont pas de réalité biologique.

5. Conclusions et discussion

Nous avons présenté dans ce chapitre une méthode de reconstruction basée sur des informations purement visuelles qui, si elle n'est pas parfaite, a permis d'obtenir des résultats préliminaires encourageants. A la différence d'autres méthodes impliquant un marquage plus ou moins intrusif (Mason, et al. 2004) nous n'influons absolument pas sur le mouvement qu'effectuerait le singe en temps normal et en cela sommes au plus proche de la réalité terrain.

Couplés avec des mesures telles que celles présentées dans (Spinks, et al. 2008, Umilta, et al. 2007) les résultats exposés ici pourraient permettre de simuler et analyser la relation entre les signaux corticaux et/ou musculaires et la configuration qui en découle. Afin d'améliorer ces résultats, plusieurs possibilités s'offrent à nous ; elles sont exposées ci-après.

a) Suppression des occultations

Le principal problème de notre méthode de mesure tient à l'occultation de certains points suivant tous les points de vue, rendant leur triangulation impossible. Dans une installation de capture de mouvement classique il n'est pas rare de compter six ou huit caméras réparties autour du sujet, et même si ici nous sommes limités par l'encombrement autour du setup il serait possible d'ajouter des caméras supplémentaires afin de compléter la couverture de l'espace de travail, en gardant bien en tête les contraintes liées à la stéréoscopie.

Si par exemple nous installions des caméras sur les quatre faces de l'espace de travail (au-dessus et au-dessous, et de chaque côté) nous ne pourrions pas utiliser le système de transfert direct que nous avons développé. En effet pour que deux caméras (ou plus) puissent être mises en relation il faut que

- le champ qu'elles couvrent soit « vu du même côté » ;
- la mire d'étalonnage soit visible de tous les points de vue, en même temps ;

Ces deux critères étant irréalisables dans le cas de caméras se faisant face, nous ne pourrions apparier les nouvelles caméras qu'avec celles déjà en place qui leur sont le plus proche, et ainsi perdrons l'aspect global de notre étalonnage. Il en irait de même en installant une caméra à l'intérieur du carousel, filmant le singe de face depuis l'autre côté de l'objet (à travers une paroi transparente).

Une autre possibilité permettant de dépasser les occultations serait d'utiliser des objets transparents, en plexiglas par exemple. Ainsi, bien que possiblement déformés, les points de référence ne seraient plus cachés par les objets.

b) Ajustement au modèle virtuel

Outre les mesures en elles-mêmes nous nous heurtons à un problème de cohérence vis-à-vis du modèle que nous voulons reproduire, en ne le faisant pas intervenir dans le processus de reconstruction en dehors des corrections anatomiques. Si ce genre de méthode a déjà prouvé qu'il pouvait fonctionner et donner de bons résultats (Yamane, Fukuda et Nakamura 2010) cela requiert une souplesse structurelle qui est absente ici : pouvoir générer et supprimer à la volée des ddls, et construire ainsi son modèle. Ainsi, afin d'améliorer nos résultats nous devrions soit intégrer cette souplesse à notre algorithme, soit faire intervenir un étage d'ajustement des données sur un modèle anatomiquement correct ; comme nous disposons déjà de ce modèle, il semble naturel de l'utiliser.

Cet ajustement compléterait le travail effectué par l'étage d'optimisation en ce qu'il s'appliquerait à la main entière ; mais en conséquence, une correction locale aurait des répercussions sur la configuration de prise complète et ainsi pourrait influencer sur la justesse du résultat.

VI. Discussion et conclusions

1. Schéma de contrôle biomimétique tiré de la littérature comportementale

L'étude du mouvement chez l'homme nous a permis d'obtenir une solution efficace au double problème d'atteinte et de saisie très rapidement et ce malgré un type de contrôle « boucle ouverte » ; nous avons montré que l'aspect calculatoire des solutions utilisées classiquement dans le domaine robotique pouvait être court-circuité par l'utilisation de données déjà optimales comme base d'apprentissage.

En intégrant à une architecture de contrôle bio-inspirée des lois tirées de la littérature comportementale chez l'homme, nous avons construit un système capable de générer des configurations de prise très proches de celles adoptées par l'homme dans sa vie quotidienne. De plus, l'implémentation de ce système dans un outil robotique physique constitue une proposition innovante de transfert humain-robot, dont la réalité a été prouvée expérimentalement.

Les résultats obtenus lors de la validation expérimentale viennent confirmer largement l'intérêt de notre approche pour le domaine robotique : la totalité des configurations testées s'est révélée efficace tant du point de vue de l'approche de l'objet que de sa saisie. En outre, notre commande bio-inspirée a permis d'observer des comportements humains directement liés à la biomécanique de la main, comme par exemple le dégagement du pouce par une orientation correcte de la paume.

En cela notre schéma de contrôle et les principes sur lesquels il est fondé peuvent désormais s'intégrer à des lois de commandes du domaine et nuancer leurs résultats.

2. Etude des synergies de préhension chez le sujet sain

Véritable complément du travail effectué lors de la construction de la première architecture de commande, l'étude que nous avons menée sur les sujets sains nous a permis d'examiner plus en détail les lois qui sous-tendent le geste de saisie humain et d'en approfondir notre connaissance. A travers l'établissement d'un protocole à la fois complet et rigoureux nous avons souhaité mettre en avant plusieurs aspects du contrôle moteur chez l'homme : sa répétabilité bien sûr, l'influence des différents facteurs lui servant « d'entrées », mais aussi sa réaction face à des contraintes venant complexifier le contexte de manipulation des objets présentés.

L'analyse des mesures obtenues nous montre que dans un contexte de manipulation limitée (déplacement et réorientation) la variabilité intra-individu se révèle assez faible, ce qui vient illustrer la théorie de l'utilisation de primitives motrices par le SNC ; au niveau inter-individus les variations se font plus marquées mais restent néanmoins dans une gamme permettant la généralisation du mouvement, ce qui montre l'influence de l'expérience personnelle sur une stratégie globale mesurable chez tous les sujets. Ajouter à ce contexte une contrainte particulièrement forte fait ressortir ce phénomène, et nous avons alors pu observer l'émergence de différentes stratégies venant illustrer le concept d'équivalence motrice.

Le dimensionnement d'un modèle de main générique, nécessaire à l'utilisation de ces données comme base d'apprentissage, nous a permis de nous concentrer sur cette variabilité en éliminant les facteurs d'échelle liés à l'anatomie. A la fois simple et efficace, ce modèle fournit un outil de généralisation au domaine de l'apprentissage par imitation en facilitant le transfert entre l'homme et la machine.

Enfin, les deux architectures de contrôle conçues pour tester ces données ont montré des résultats en simulation encourageants, dont la validation sur site nous permettra de vérifier la pertinence.

3. Modélisation du geste de saisie chez le singe à partir de vidéos

L'étude du mouvement dans le modèle animal n'est pas un problème simple à résoudre, car contrairement à l'homme il y est très difficile de faire abstraction des contraintes et perturbations ; il est cependant essentiel en ce qu'il permet d'explorer les mécanismes biologiques qui le composent à des niveaux bien plus nombreux et précis que ce que n'autorise la recherche sur l'homme. La méthode que nous avons mise en place fournit un outil d'analyse de ce modèle à la fois transparent pour l'animal, souple dans sa mise en place et efficace si tant est que les données mesurées soient de qualité suffisante.

Notre méthode d'étalonnage multi-caméras représente une solution originale et facilement adaptable à tout site expérimental utilisant de la stéréovision. En réalisant autant de calibrages de paires stéréo que nécessaire et en injectant à chaque fois les résultats de l'estimation des différents paramètres d'un étalonnage dans le suivant, nous avons prouvé qu'il était possible d'établir une cohérence globale du système et ainsi ramener toutes les mesures dans un repère de référence unique, quel que soit celui dans lequel il ait été mesuré.

En nous appuyant sur les performances de ce premier outil nous en avons développé un second visant à reconstruire de manière semi-automatique les points caractérisant la main d'un singe alors qu'il réalisait des tâches de saisie. Ce système, conçu de manière à pouvoir générer une solution même s'il ne lui est fourni que des données partielles et mettant en rapport cette solution avec des mesures anatomiques, nous a permis de reconstruire de manière fidèle la majorité des six configurations de prises utilisées à travers la moyenne de leurs différentes itérations.

Ces configurations ont ensuite été testées sur notre modèle 3D du bras d'un singe placé dans une simulation du site de mesure. Ce modèle est une reproduction anatomique fidèle et précise basée sur des données d'imagerie médicale de forte résolution, et dont les mouvements correspondent à ceux de son équivalent biologique. Il constitue donc un outil de validation théorique d'excellente qualité et nous a permis d'évaluer la qualité des positions établies en amont par le système.

Les différents outils réalisés au cours de ces travaux composent une chaîne de traitement permettant d'appréhender la réalité des mouvements effectués par le singe à partir de données purement visuelles, et ainsi de pouvoir les caractériser en vue d'une possible classification. Mis en relation avec les signaux neuronaux qui en sont à l'origine, ces résultats représentent une étape supplémentaire dans la compréhension du contrôle moteur chez le singe, et donc possiblement chez l'homme.

VII. Annexes

1. Modèle géométrique du robot Kuka KR16

Lors du travail effectué sur le robot porteur, nous avons établi son paramétrage Denavit-Hartenberg (Spong, Hutchinson et Vidyasagar 2006) et construit les matrices de transfert entre chaque axe suivant le formalisme rappelé par (Équation VII-1).

$$(Équation VII-1) \quad T_{i-1,i} = Rot_z(\theta_i) * Tr(0,0,R_i) * Tr(D_i,0,0) * Rot_x(\alpha_i)$$

Soit, si l'on exprime le passage de l'axe $i-1$ à i sous forme de matrices de transformation homogène :

$$T_{i-1,i} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & D_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{i-1,i} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & D_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & D_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & R_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Équation VII-2)

On rappelle la taille des différents segments inter-axes (voir Figure III-8):

Tableau VII-1. Taille des segments du Kuka KR16

Dénomination	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Taille (mm)	675	260	680	35	670	158

Tableau VII-2. Paramétrisation DH pour Kuka KR16

Numéro de liaison	Theta (°)	R (cm)	Alpha (°)	D (cm)
0	X	0	0	0
1	Θ_1	L1	-90	L2
2	Θ_2	0	0	L3
3	$\Theta_3 - 90$	0	-90	-L4
4	Θ_4	L5	90	0
5	Θ_5	0	-90	0
6	Θ_6	L6	0	0

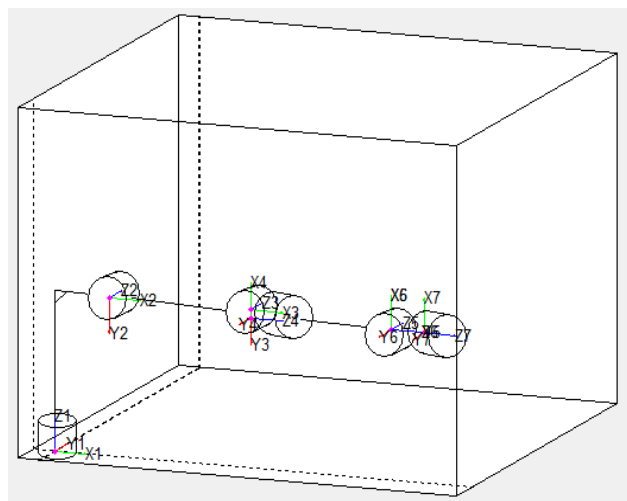


Figure VII-1. Vue simplifiée de la chaîne cinématique du porteur et des référentiels associés aux différents axes.

On a donc les relations suivantes:

$$T_{0,1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 & L_2 * \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & L_2 * \sin\theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Équation VII-3)

$$T_{1,2} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & L_3 * \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & L_3 * \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Équation VII-4)

$$T_{2,3} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3 - 90^\circ) & 0 & -\sin(\theta_3 - 90^\circ) & -L_4 * \cos(\theta_3 - 90^\circ) \\ \sin(\theta_3 - 90^\circ) & 0 & \cos(\theta_3 - 90^\circ) & -L_4 * \sin(\theta_3 - 90^\circ) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Équation VII-5)

$$T_{3,4} = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & \sin\theta_4 & 0 \\ \sin\theta_4 & 0 & -\cos\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Équation VII-6)

$$T_{4,5} = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & 0 & -\sin\theta_5 & 0 \\ \sin\theta_5 & 0 & \cos\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Équation VII-7)

$$T_{5,6} = \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ \sin\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Équation VII-8)

Pour la suite et pour plus de clarté nous adopterons les règles de notation usuelles :

- $\cos \theta_i = C_i$,
- $\sin \theta_i = S_i$,
- $\cos(\theta_i + \theta_j) = C_{ij}$
- $\sin(\theta_i + \theta_j) = S_{ij}$

Ce qui nous permet de construire le modèle direct :

$$T_{0,2} = \begin{bmatrix} C_1 C_2 & -C_1 S_2 & -S_1 & C_1(L_3 C_2 + L_2) \\ S_1 C_2 & -S_1 S_2 & C_1 & S_1(L_3 C_2 + L_2) \\ -S_2 & -C_2 & 0 & -L_3 S_2 + L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Équation VII-9)

Si l'on pose $C_3 = \cos(\theta_3 - 90^\circ)$ et $S_3 = \sin(\theta_3 - 90^\circ)$ on obtient (Équation VII-10)

$$T_{0,3} = \begin{bmatrix} C_1(C_2 C_3 - S_2 S_3) & S_1 & -C_1(C_2 S_3 + S_2 C_3) & C_1(L_4 C_2 C_3 - L_4 S_2 S_3 + L_3 C_2 + L_2) \\ S_1(C_2 C_3 - S_2 S_3) & -C_1 & -S_1(C_2 S_3 + S_2 C_3) & S_1(L_4 C_2 C_3 - L_4 S_2 S_3 + L_3 C_2 + L_2) \\ -(S_2 C_3 + C_2 S_3) & 0 & (S_2 S_3 - C_2 C_3) & -(L_4 C_2 S_3 + L_4 S_2 C_3 + L_3 S_2) + L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Puis (Équation VII-11) :

$$T_{0,3} = \begin{bmatrix} M_1 & S_1 & K_1 & P_1 \\ M_2 & C_1 & K_2 & P_2 \\ M_3 & 0 & K_3 & P_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

on a (Équation VII-12) :

$$T_{0,4} = \begin{bmatrix} M_1 C_4 + S_1 S_4 & K_1 & M_1 S_4 - S_1 C_4 & K_1 L_5 + P_1 \\ M_2 C_4 - C_1 S_4 & K_2 & M_2 S_4 + C_1 C_4 & K_2 L_5 + P_2 \\ M_3 C_4 & K_3 & M_3 S_4 & K_3 L_5 + P_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Et enfin (Équation VII-13) :

$$T_{0,5} = \begin{bmatrix} (M_1 C_4 + S_1 S_4) C_5 + K_1 S_5 & -(M_1 S_4 - S_1 C_4) & -(M_1 C_4 + S_1 S_4) S_5 + K_1 C_5 & K_1 L_5 + P_1 \\ (M_2 C_4 - C_1 S_4) C_5 + K_2 S_5 & -(M_2 S_4 + C_1 C_4) & -(M_2 C_4 - C_1 S_4) S_5 + K_2 C_5 & K_2 L_5 + P_2 \\ M_3 C_4 C_5 + K_3 S_5 & -M_3 S_4 & -M_3 C_4 S_5 + K_3 C_5 & K_3 L_5 + P_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

De la même façon que pour $T_{0,3}$ (Équation VII-14),

$$T_{0,5} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & D_1 & F_1 \\ A_2 & B_2 & D_2 & F_2 \\ A_3 & B_3 & D_3 & F_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

nous donne en dernier lieu

$$T_{0,6} = \begin{bmatrix} A_1 C_6 + B_1 S_6 & -A_1 S_6 + B_1 C_6 & D_1 & D_1 L_6 + F_1 \\ A_2 C_6 + B_2 S_6 & -A_2 S_6 + B_2 C_6 & D_2 & D_2 L_6 + F_2 \\ A_3 C_6 + B_3 S_6 & -A_3 S_6 + B_3 C_6 & D_3 & D_3 L_6 + F_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Équation VII-15)

2. Modèle géométrique de la main LMS

Chaque chaîne est exprimée en fonction du repère de la main (Rp), et constituée de 7 matrices de transformation homogène :

(Équation VII-16)
$$T_{Rp,end_eff} = T_{Rp,1} * T_{1,2} * T_{2,3} * T_{3,4} * T_{4,5} * T_{5,6} * T_{6,end_eff}$$

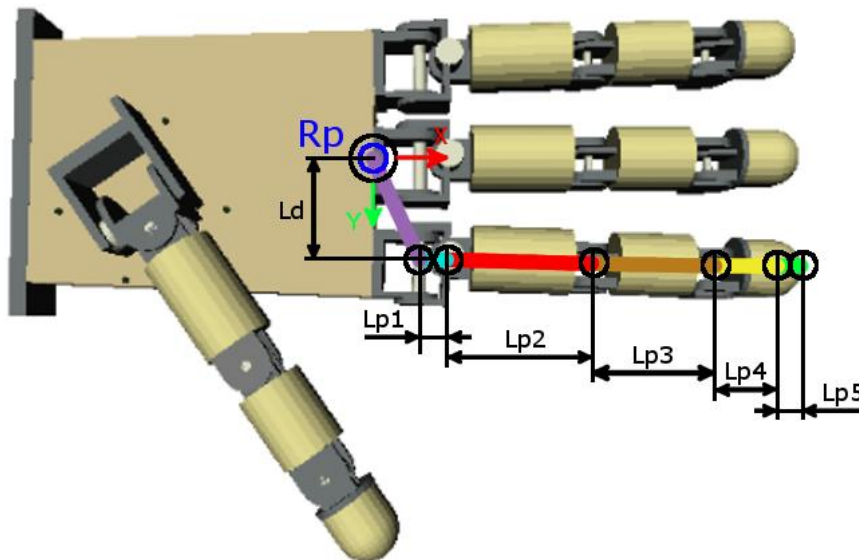


Figure VII-2. Représentation schématique des différentes longueurs entrant en compte dans le modèle géométrique des doigts : exemple de l'index.

On rappelle la taille des différents segments inter-axes (voir Figure VII-2):

Dénomination	Lp1	Lp2	Lp3	Lp4	Lp5
Pouce (mm)	7	43	35	17.5	8.5
Doigts longs (mm)	8.5	41.5	35	17.5	8.5

a) Modèle d'un doigt long

Les doigts longs ayant la même géométrie, nous n'établirons la chaîne de transfert qu'une seule fois pour les trois ; le pouce fera l'objet d'une étude particulière.

On a donc, pour les doigts longs :

$$(Équation VII-17) \quad T_{Rp,1} = \begin{bmatrix} C\omega_d & -S\omega_d & 0 & 13.5 \\ S\omega_d & C\omega_d & 0 & L_d \\ 0 & 0 & 1 & 7.3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Avec l'angle d'ouverture des doigts $\omega_d = [-2, 0, 2]^\circ$ et l'écartement de l'implantation des doigts $L_d = [-28.85, 0, 28.95]$ mm pour l'index, le majeur et l'annulaire, respectivement. Les autres relations quant à elles sont indifférenciées :

$$(Équation VII-18) \quad T_{1,2} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_1 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (Équation VII-19) \quad T_{2,3} = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & L_{p1} \\ S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(Équation VII-20) \quad T_{3,4} = \begin{bmatrix} C_3 & 0 & S_3 & L_{p2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_3 & 0 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (Équation VII-21) \quad T_{4,5} = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & S_4 & L_{p3} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_4 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Soit la relation finale $T_{1,5}$ (par souci de clarté on se limitera ici à la partie « active » de la chaîne cinématique, c'est-à-dire celle qui comprend les différents ddl du doigt) (Équation VII-22) :

$$T_{1,5} = \begin{bmatrix} C_1C_2C_{34} - S_1S_{34} & -C_1S_2 & C_1C_2S_{34} + S_1S_{34} & (C_1C_2C_3 - S_1S_3)*L_{p3} + C_1C_2*L_{p2} + C_1*L_{p1} \\ S_2C_{34} & C_2 & S_2S_{34} & S_2C_3*L_{p3} + S_2*L_{p2} \\ -S_1C_2C_{34} - C_1S_{34} & S_1S_2 & -S_1C_2S_{34} + C_1C_{34} & -(S_1C_2C_3 - C_1S_3)*L_{p3} + S_1C_2*L_{p2} + S_1*L_{p1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La dernière composante permettant d'arriver au point terminal ne peut pas à proprement parler être exprimée par une transformation puisque celui-ci se trouve sur une sphère de rayon L_{p5} ; on notera cependant les matrices de passage $T_{5,6}$ et T_{6,end_eff} permettant d'obtenir la longueur totale du doigt :

$$(Équation VII-23) \quad T_{5,6} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_{p4} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(Équation VII-24) \quad T_{6,end_eff} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_{p5} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Soit, si l'on pose l'équivalence

$$(Équation VII-25) \quad T_{1,5} = \begin{bmatrix} G_1 & H_1 & I_1 & J_1 \\ G_2 & H_2 & I_2 & J_2 \\ G_3 & H_3 & I_3 & J_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On a

$$(Équation VII-26) \quad T_{R_p, end_eff} = \begin{bmatrix} G_1 & H_1 & I_1 & G_1(L_{p4} + L_{p5}) + J_1 \\ G_2 & H_2 & I_2 & G_2(L_{p4} + L_{p5}) + J_2 \\ G_3 & H_3 & I_3 & G_3(L_{p4} + L_{p5}) + J_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

b) Modèle du pouce

Les relations suivent la même logique que pour les doigts longs :

$$(Équation VII-27) \quad T_{Rp,1} = \begin{bmatrix} C\omega_p & -S\omega_p & 0 & -59.56 \\ S\omega_p & C\omega_p & 0 & 18.52 \\ 0 & 0 & 1 & -10.7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Avec l'angle d'ouverture du pouce}$$

$$\omega_p = -35^\circ$$

$$(Équation VII-28) \quad T_{1,2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_1 & -S_1 & 0 \\ 0 & S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(Équation VII-29) \quad T_{2,3} = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & 0 \\ S_2 & C_2 & 0 & L_{p1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(Équation VII-30) \quad T_{3,4} = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & 0 \\ S_3 & C_3 & 0 & L_{p2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(Équation VII-31) \quad T_{4,5} = \begin{bmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & 0 \\ S_4 & C_4 & 0 & L_{p3} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Soit la relation finale $T_{1,5}$:

$$(Équation VII-32) \quad T_{1,5} = \begin{bmatrix} C_{234} & -S_{234} & 0 & -S_{23} * L_{p3} - S_2 * L_{p2} \\ C_1 S_{234} & C_1 C_{234} & -S_1 & C_1 C_{23} * L_{p3} + C_1 C_2 * L_{p2} + C_1 * L_{p1} \\ S_1 S_{234} & S_1 C_{234} & C_1 & S_1 C_{23} * L_{p3} + S_1 C_2 * L_{p2} + S_1 * L_{p1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

De même que pour les doigts longs, la dernière matrice de passage T_{6,end_eff} ne peut servir qu'à calculer la longueur totale du doigt :

$$(Équation VII-33) \quad T_{5,6} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_{p4} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(Équation VII-34) \quad T_{6,end_eff} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_{p5} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Encore une fois, considérant l'équivalence

$$(Équation VII-35) \quad T_{1,5} = \begin{bmatrix} G_1 & H_1 & I_1 & J_1 \\ G_2 & H_2 & I_2 & J_2 \\ G_3 & H_3 & I_3 & J_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On obtient (Équation VII-36)

$$T_{R_p,end_eff} = \begin{bmatrix} G_1 & H_1 & I_1 & H_1(L_{p4} + L_{p5}) + J_1 \\ G_2 & H_2 & I_2 & H_2(L_{p4} + L_{p5}) + J_2 \\ G_3 & H_3 & I_3 & H_3(L_{p4} + L_{p5}) + J_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3. Validation expérimentale des prises générées par l'architecture de contrôle ABILIS

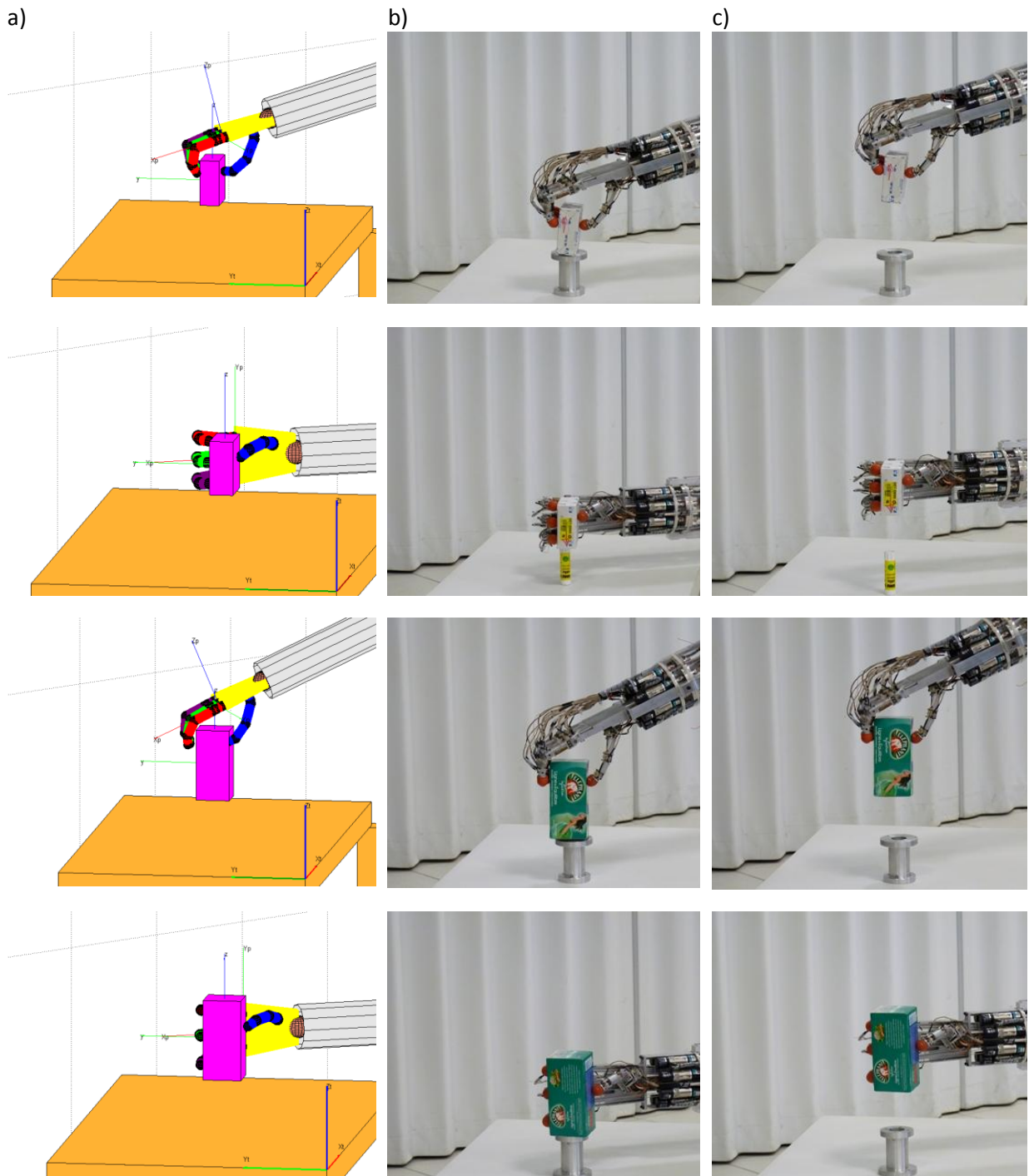


Figure VII-3. Validation expérimentale de l'atteinte, la saisie et le soulèvement pour les parallélépipèdes, positionnés au centre de la table (voir Tableau III-5) : S Box (dessus, côté), B Box (dessus, côté).
a) Configuration d'atteinte et saisie générée par l'architecture de contrôle. b) Application de la configuration au site expérimental. c) soulèvement de l'objet.

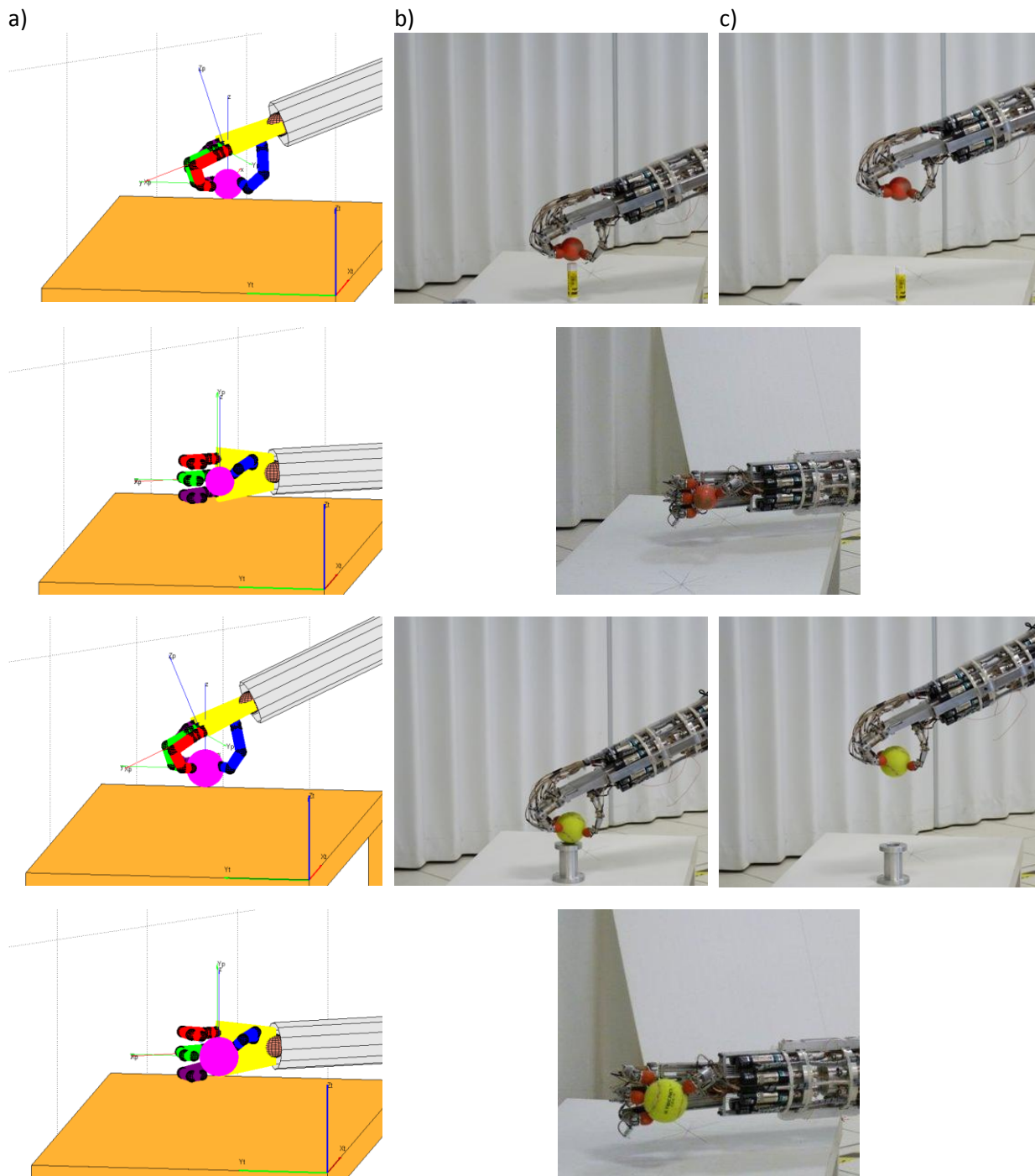


Figure VII-4. Validation expérimentale de l'atteinte, la saisie et le soulèvement pour les sphères, positionnées au centre de la table (voir Tableau III-5) : VS Sph (dessus, côté), S Sph (dessus, côté).

a) Configuration d'atteinte et saisie générée par l'architecture de contrôle. b) Application de la configuration au site expérimental. c) soulèvement de l'objet.

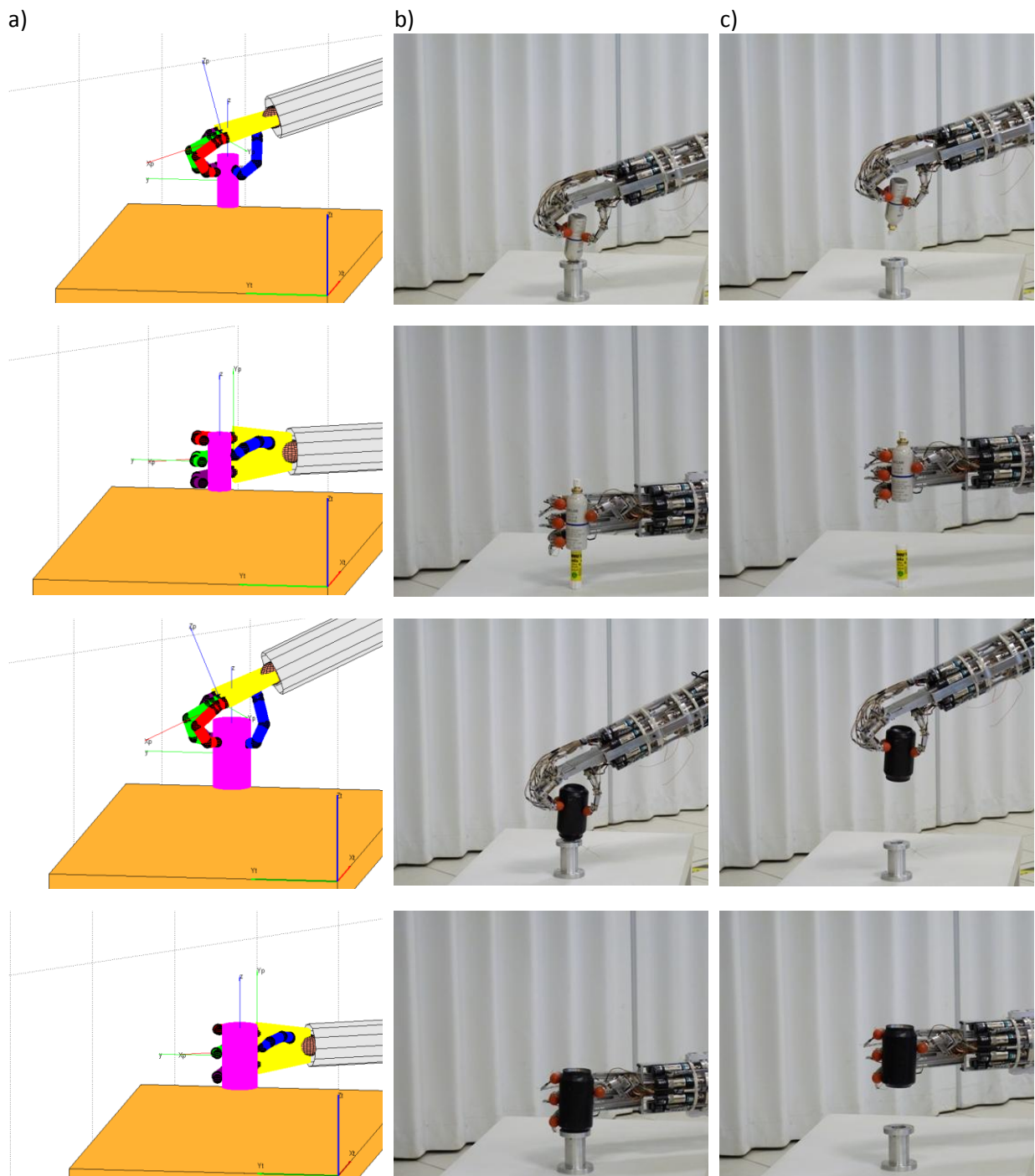


Figure VII-5. Validation expérimentale de l'atteinte, la saisie et le soulèvement pour les cylindres verticaux, positionnés au centre de la table (voir Tableau III-5) :S V Cyl (dessus, côté), B V Cyl (dessus, côté).

a) Configuration d'atteinte et saisie générée par l'architecture de contrôle. b) Application de la configuration au site expérimental. c) soulèvement de l'objet.

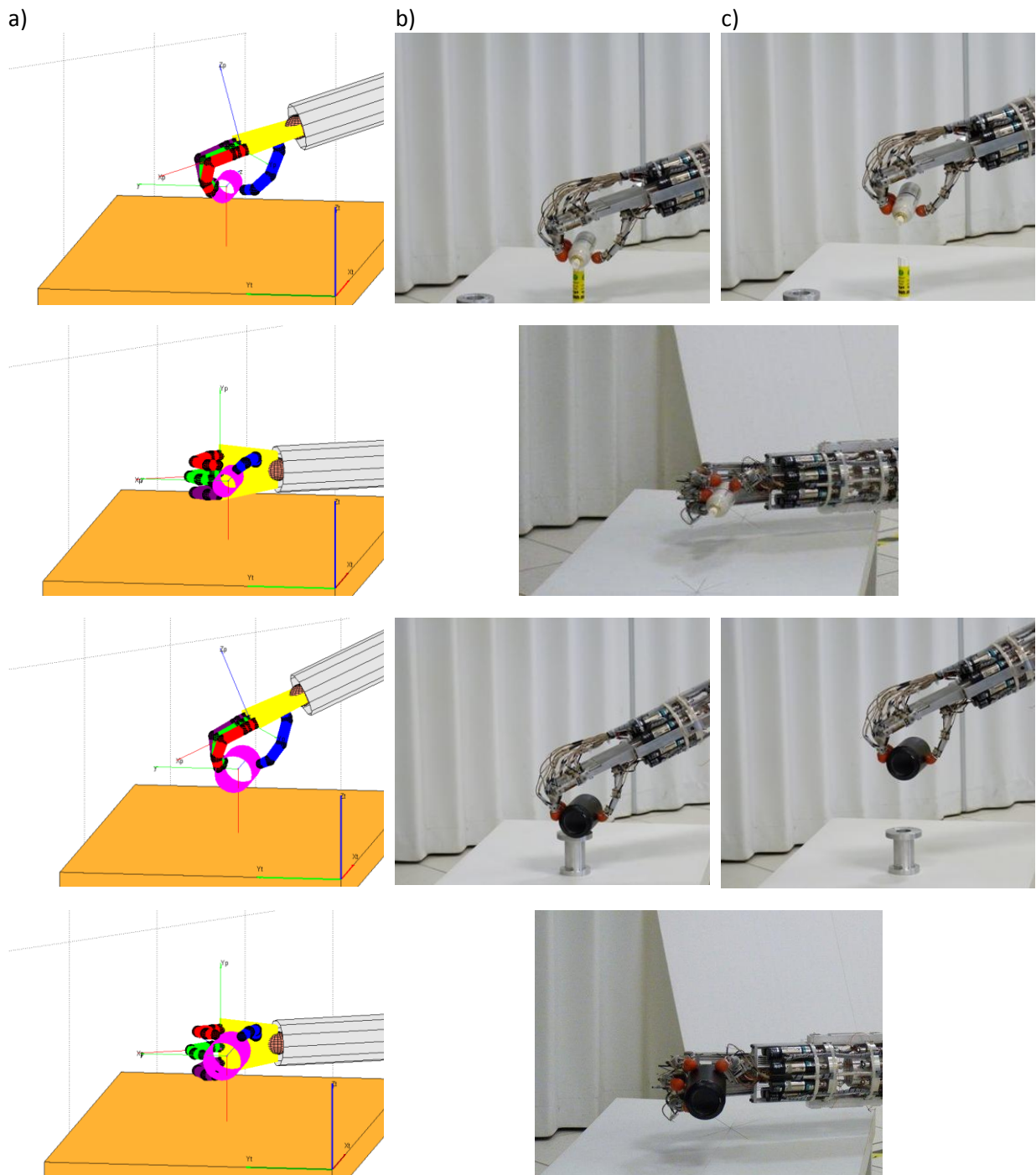


Figure VII-6. Validation expérimentale de l'atteinte, la saisie et le soulèvement pour les cylindres horizontaux, positionnés au centre de la table (voir Tableau III-5) : S H Cyl (dessus, côté), B H Cyl (dessus, côté).

a) Configuration d'atteinte et saisie générée par l'architecture de contrôle. b) Application de la configuration au site expérimental. c) soulèvement de l'objet.

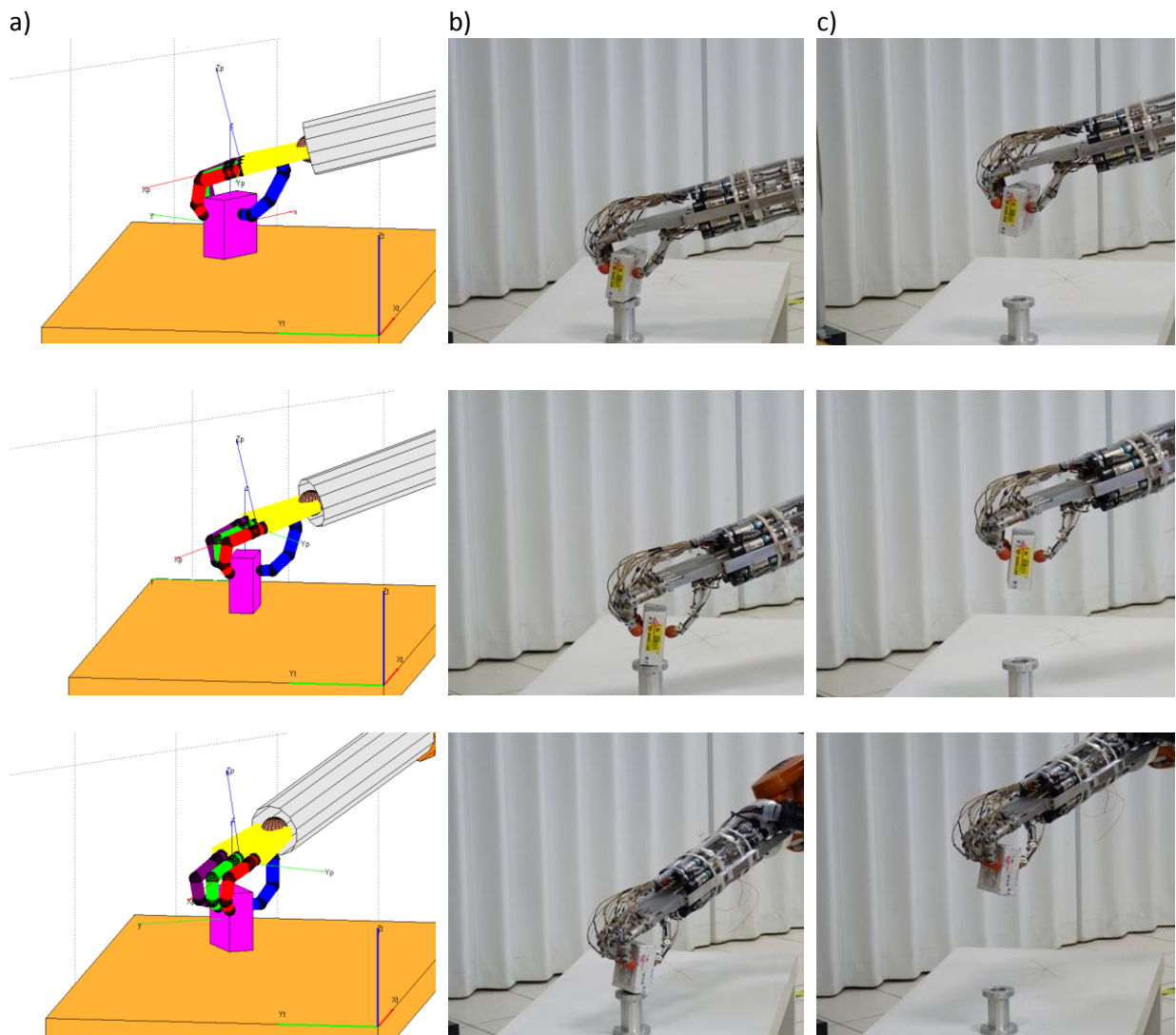


Figure VII-7. Validation expérimentale de l'atteinte, la saisie et le soulèvement pour le petit parallélépipède, positionné à -25cm du centre de la table (axe X_{obj}) selon trois orientations $\alpha_{obj} = -30^\circ, 0^\circ, +30^\circ$ (voir Tableau III-6).

a) Configuration d'atteinte et saisie générée par l'architecture de contrôle. b) Application de la configuration au site expérimental. c) soulèvement de l'objet.

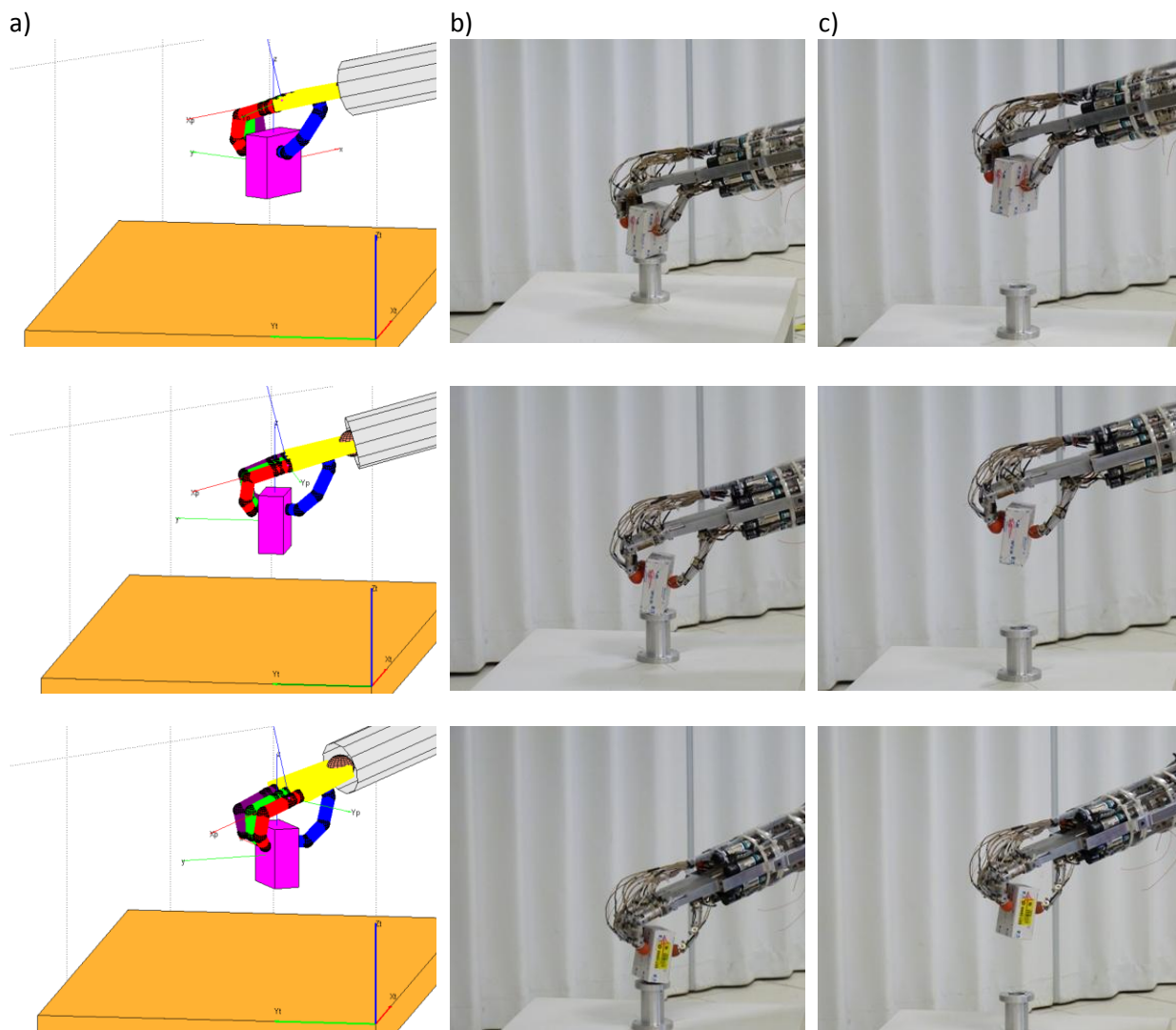


Figure VII-8. Validation expérimentale de l'atteinte, la saisie et le soulèvement pour le petit parallélépipède, positionné à +25cm du centre de la table(axe X_{obj}) selon trois orientations $\alpha_{obj} = -30^\circ, 0^\circ, +30^\circ$ (voir Tableau III-6).

a) Configuration d'atteinte et saisie générée par l'architecture de contrôle. b) Application de la configuration au site expérimental. c) soulèvement de l'objet.

4. Documents relatifs à l'expérimentation « Synergies de Préhension chez le Sujet Sains »

Fiche d'information

Notre expérience vise une meilleure compréhension de l'utilisation de la main pour saisir un objet et le déplacer chez le sujet sain. Nous allons pour cela mesurer vos mouvements grâce à un gant instrumenté.

1 - Session expérimentale

L'étude se déroule en une seule session expérimentale, à l'Université Paris Descartes (45 rue des Saints-Pères) à Paris. A votre arrivée, vous signerez la feuille de consentement de participation à l'expérience après l'avoir lue et approuvée. L'expérience dure approximativement 2 heures.

Le principe de l'expérience est le suivant : après avoir placé votre main droite sur le point de départ vous allez devoir saisir et déplacer un objet sur un emplacement prédéfini avec cette même main, puis la replacer au point de départ. La saisie se fera uniquement par la pulpe des doigts, l'objet ne doit pas toucher votre paume ou l'intérieur de vos phalanges.

2 - Installation

Pour commencer, vous allez vous asseoir et nous allons effectuer une série de mesures anatomiques préliminaires : largeur des épaules, longueur du bras entre le centre de paume et l'épaule, longueur de certaines phalanges ; il sera aussi effectué une photocopie de votre main.

Ensuite nous allons vous passer le gant instrumenté et effectuer une série de mouvements prédéfinis afin de nous assurer que les capteurs fonctionnent correctement.

Enfin, vous allez vous placer face à la table sur laquelle sont marquées les différentes positions, et nous allons régler la hauteur du siège afin que vous soyez installé confortablement. Vous pouvez poser votre bras gauche au repos sur la table.

3 - Consignes

Comme expliqué en 1, le principe de l'expérience est de saisir et déplacer des objets entre deux points et ce de deux façons différentes : par le côté et par au-dessus. Les consignes vous seront données à travers le casque audio, vous indiquant comment saisir l'objet et où le placer (combinaison d'une couleur : *rouge, vert, bleu* ; et d'une distance : *proche, moyen, distant*). Il n'y a pas de « top départ », à chaque fois que vous entendez une consigne vous pouvez lancer le mouvement. Chaque trajet sera effectué plusieurs fois afin d'avoir suffisamment de données. Voici un schéma expliquant les différentes positions (fig. 1):

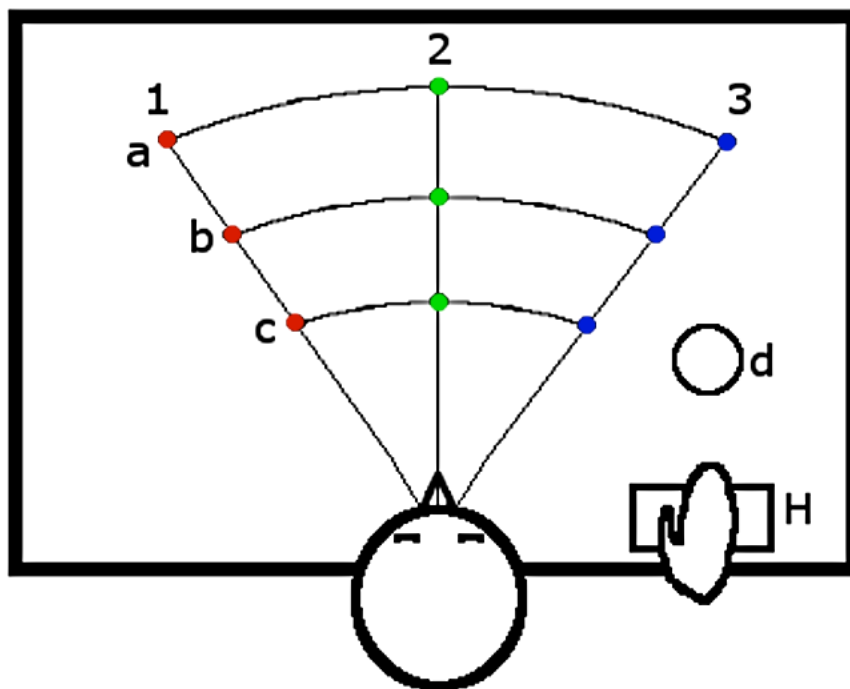


Fig. 1 : Les différentes positions utilisées dans l'expérience.

Le déplacement s'effectuera toujours entre le point de départ **d** et l'un des points notés **a1**, **a2**,... à **c3**, dans un sens ou l'autre. Au début et à la fin de chaque déplacement de l'objet, la main du sujet devra revenir se poser à l'emplacement de repos **H**.

L'expérience se divise en trois phases.

a. Phase 1 : Exploration du domaine de travail

Ici nous allons simplement vous présenter six objets (une petite et une grande boîte, un petit et un grand cylindre, une petite et une grande sphère) qu'il faudra saisir en **d** puis poser en **a1**, **a2**,... **c3** ; avant d'effectuer le trajet inverse. Vous pouvez voir que les objets ont une marque de couleur (face entière pour les boîtes, bande pour les cylindres, tache pour les sphères) ; cela correspond à la zone sur laquelle vous devrez placer votre pouce lors de la prise. Il vous sera demandé aléatoirement de

les saisir par le côté ou par le haut ; chaque trajet sera répété trois fois. A chaque fois que l'objet reviendra au point **d** l'expérimentateur vérifiera son orientation et la corrigera le cas échéant.

Les schémas ci-dessous résument cette phase (fig.2).

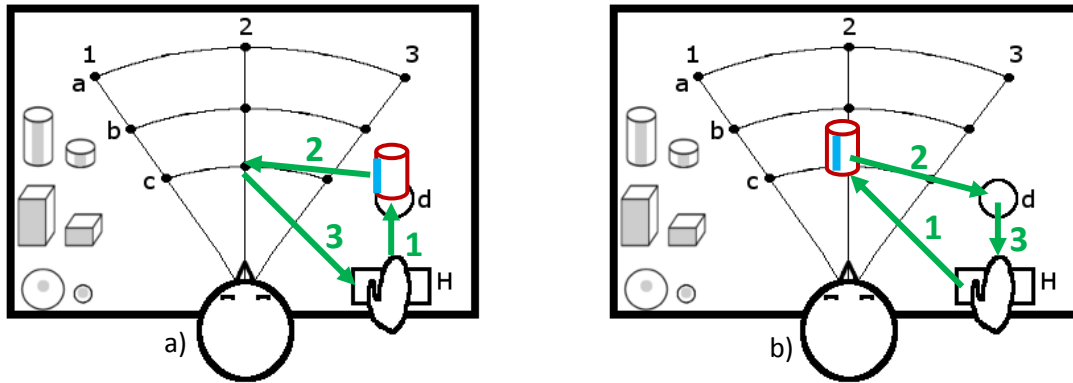


Fig. 2 : Prise-dépose avec saisie de côté. a) prise de l'objet en position **d** et dépose en position **c2**. b) retour de l'objet en **d** depuis **c2**.

Lors du déplacement de l'objet de **d** vers **a1**, **a2**,... **c3** vous aurez une consigne complète (type de saisie, couleur et distance du point cible) ; lors du retour vers **d** vous n'aurez pour consigne que le type de prise et le mot « retour ». Les types de prise à l'aller et au retour sont identiques.

b. Phase 2 : Modification de l'orientation 1

Pour cette phase nous allons utiliser uniquement la grande boîte et les points de la ligne **b**. Cette fois-ci il va vous falloir déplacer la boîte depuis l'un des points **b1**, **b2** ou **b3** jusqu'au point **d**, l'orientation initiale de la boîte variant suivant les angles montrés par la fig. 3b et son orientation finale étant imposée. Une fois l'objet déposé en **d** et votre main sur le point de repos **H**, l'expérimentateur placera l'objet sur l'un des trois points de départ avec une orientation donnée.

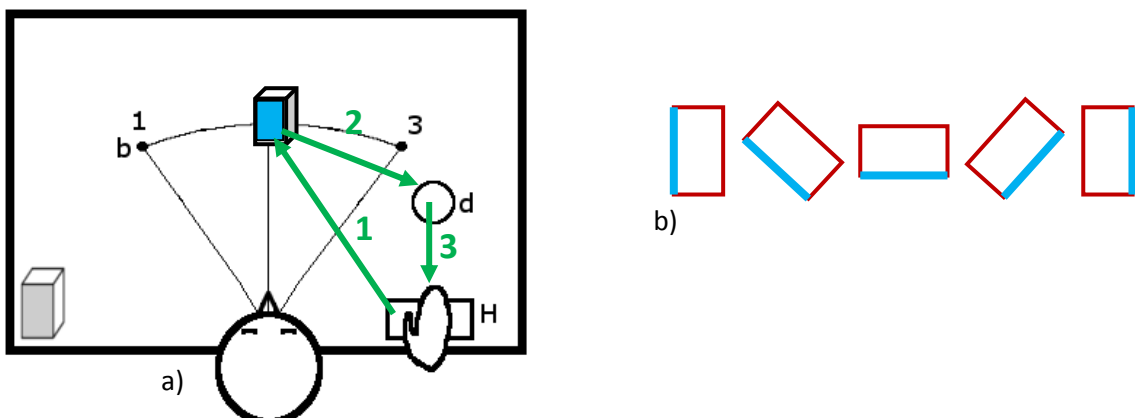


Fig. 3 : Prise-dépose avec saisie de côté. a) prise de l'objet en position **b2** et dépose en position **d**. b) Les 5 orientations données à l'objet en chaque point **b1**, **b2** et **b3**. L'orientation imposée en **d** sera la première à gauche.

c. Phase 3 : Modification de l'orientation 2

Maintenant nous n'allons utiliser qu'un seul objet (un cylindre penché) et un seul point (**b2**). Cette fois encore il va vous falloir déplacer le cylindre depuis **b2** jusqu'à **d** après l'avoir saisi par le haut ou par le côté. Chaque trajet sera répété trois fois et l'objet sera replacé en **b2** par l'expérimentateur à chaque fin de mouvement. Ici aussi l'orientation initiale du cylindre variera suivant les angles montrés par la fig. 4b et son orientation finale sera imposée. Cette phase sera composée de deux sous-parties, le cylindre étant retourné par l'expérimentateur entre les deux.

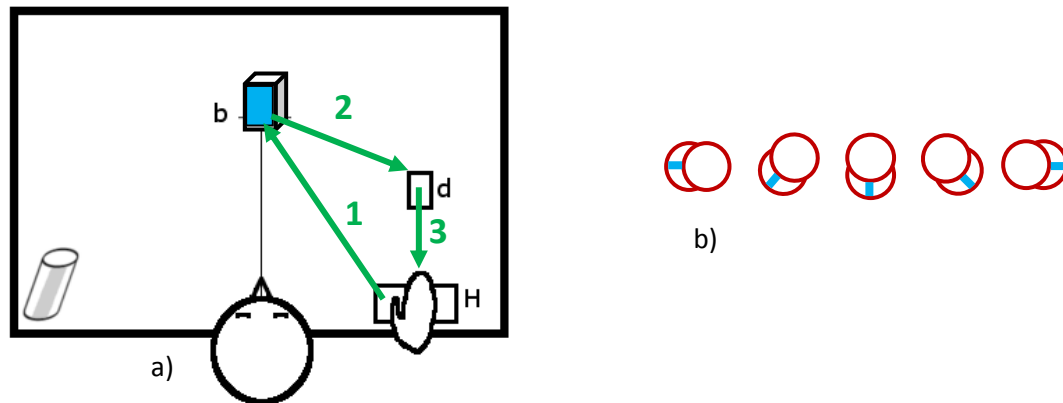


Fig. 3 : Prise-dépose avec saisie de côté. a) prise de l'objet en position **b3** et dépose en position **d**. b) Les 5 orientations données à l'objet au point **b3**. L'orientation imposée en **d** sera la première à gauche.

d. Consignes générales

Il est important que vous adoptiez un comportement naturel : ne réfléchissez pas (trop) à ce que vous devez faire ou à ce que vous pourriez observer, essayez simplement de remplir la tâche naturellement et du mieux que vous le pouvez ; au cas où vous vous trompiez, finissez le mouvement malgré tout.

Malgré le cadencement des consignes il n'y a pas de « timing » pré-établi ; trouvez simplement le rythme qui vous convient et qui nous permette d'obtenir des mesures correctes. Surtout n'oubliez pas de ramener votre main à la position de repos **H**, c'est très important !

De même, nous vous rappelons que les objets ne doivent être attrapés que par la pulpe des doigts (dernière phalange).

De par la durée de l'étude (2h environ), vous êtes bien entendu autorisé à effectuer des pauses entre les différentes séries. Cependant une fois le gant enfilé vous ne pourrez plus sortir de la pièce, pensez à prendre vos précautions (toilettes, bouteille d'eau, pull).

4 - Bénéfices et risques de la recherche

Bénéfice collectif potentiel :

- Contribution à la compréhension des schémas de prise chez l'homme.
- Possibilité d'augmenter l'efficacité des prothèses robotisées.

Bénéfice individuel direct :

- aucun

Risque collectif indirect :

- aucun.

Risque individuel direct :

- Sensations liées au travail des muscles, notamment au niveau de l'épaule.

5- Conditions

vos droits

Vous pouvez évidemment arrêter l'expérience à tout moment sans avoir à vous justifier et sans que cela vous soit préjudiciable.

Par ailleurs, nous pourrions vous communiquer, si vous le souhaitez, vos résultats.

Enfin, sachez que nous traiterons vos données de manière parfaitement confidentielle et anonyme, conformément aux lois en vigueur concernant le respect de la vie privée.

Le protocole de cette étude a été soumis et approuvé par un comité d'éthique en conformité avec le traité d'Helsinki.

conditions que vous devez remplir

Vous devez ne pas avoir de problème moteur, maladie neurologique ou orthopédique touchant le membre supérieur.

Vous devez être droitier car nous ne disposons que d'un gant de mesure « droit ».

Si vous acceptez de participer à cette étude, un rendez-vous vous sera proposé par François Touvet dans le laboratoire CESeM, au 45 rue des Saints-Pères, 75006 Paris.

Cette expérience ne donne pas lieu à rémunération.

Formulaire de consentement

Je soussigné(e)

accepte de participer à l'expérimentation intitulée « Synergies de Préhension chez le Sujet Sain » prenant place à l'Université Paris Descartes (45 rue des Saints Pères, Paris) pour une durée de deux heures environ, et dont les modalités m'ont été exposées dans le document nommé « Fiche d'information ».

J'accepte que les mesures effectuées pendant cette expérimentation soient utilisées en vue de publication scientifique, sous condition du respect de l'anonymat auquel s'est engagé l'expérimentateur.

J'accepte de ne percevoir aucune rémunération en contrepartie de ma participation.

Signature du sujet :

Date :

Signature de l'investigateur :

Date :

Retour d'expérience

Merci d'avoir participé à cette expérience. Je souhaiterais maintenant connaître votre ressenti sur son déroulement afin d'approfondir les observations que j'ai pu en tirer, et l'améliorer le cas échéant. La deuxième page comprend une photo du site pour vous aider à vous rappeler, si besoin.

1. Parmi les différents objets, lequel vous a semblé le plus difficile à manipuler et pourquoi? classez les objets par ordre de difficulté (1 : le plus difficile, 2 : un peu moins difficile, etc). La même valeur peut être assignée plusieurs fois.

Tâche 1 : les six objets à déplacer sur les 9 points, plus particulièrement

- a. le bloc horizontal de taille moyenne
- b. le petit bloc horizontal
- c. le cylindre vertical de taille moyenne
- d. le petit cylindre vertical
- e. la sphère de taille moyenne dans les coupelles
- f. la petite sphère sur les coupelles

Tâche 2 : le grand bloc vertical dont la position et l'orientation changent

Tâche 3 : le cylindre incliné dont l'orientation change, plus particulièrement

- g. le cylindre incliné vers l'extérieur
- h. le cylindre incliné vers l'intérieur

2. De manière générale, avez-vous trouvé les tâches difficiles à réaliser ?

Tâche 1 : oui, très! / oui, un peu / non, pas trop / non, absolument pas

Tâche 2 : oui, très! / oui, un peu / non, pas trop / non, absolument pas

Tâche 3 : oui, très! / oui, un peu / non, pas trop / non, absolument pas

3. Par quel(s) facteur(s) pensez-vous avoir été influencé(e) pendant la réalisation des tâches ? classez vos réponses par ordre de priorité (1 : le plus influent, 2 : un peu moins influent, etc). La même valeur peut être assignée plusieurs fois.

- a. Forme des objets
- b. Dimensions des objets
- c. Orientation des objets
- d. Masse des objets
- e. Couleur des points-cible
- f. Position des points-cible
- g. Alignement des points-cible
- h. Contrainte de positionnement du pouce
- i. Contrainte d'orientation de l'objet
- j. Autre (précisez)

4. Avez-vous trouvé les conditions d'expérimentation (confort, installation) et les explications fournies satisfaisantes ?

Avez-vous ressenti des douleurs à l'épaule / au bras / à la main pendant / après l'expérience ?

5. Résultats de la reconstruction des configurations de prise à partir d'acquisitions vidéo

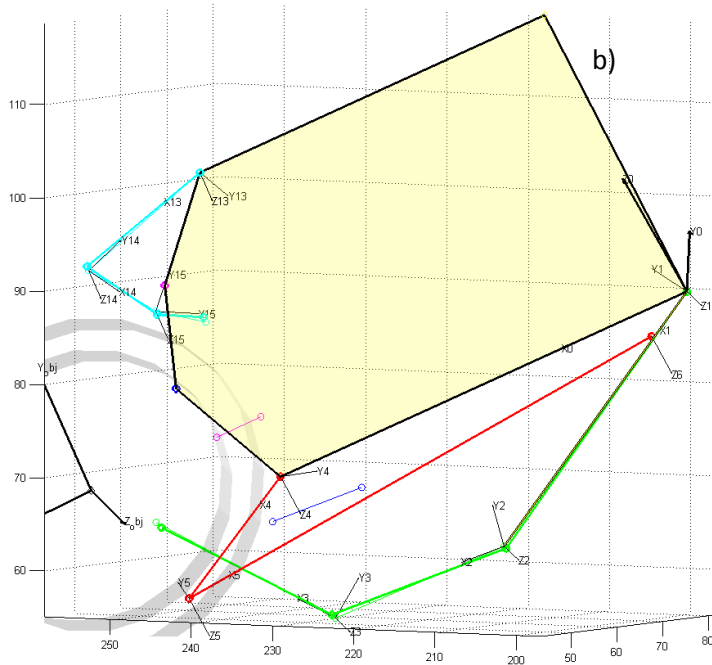
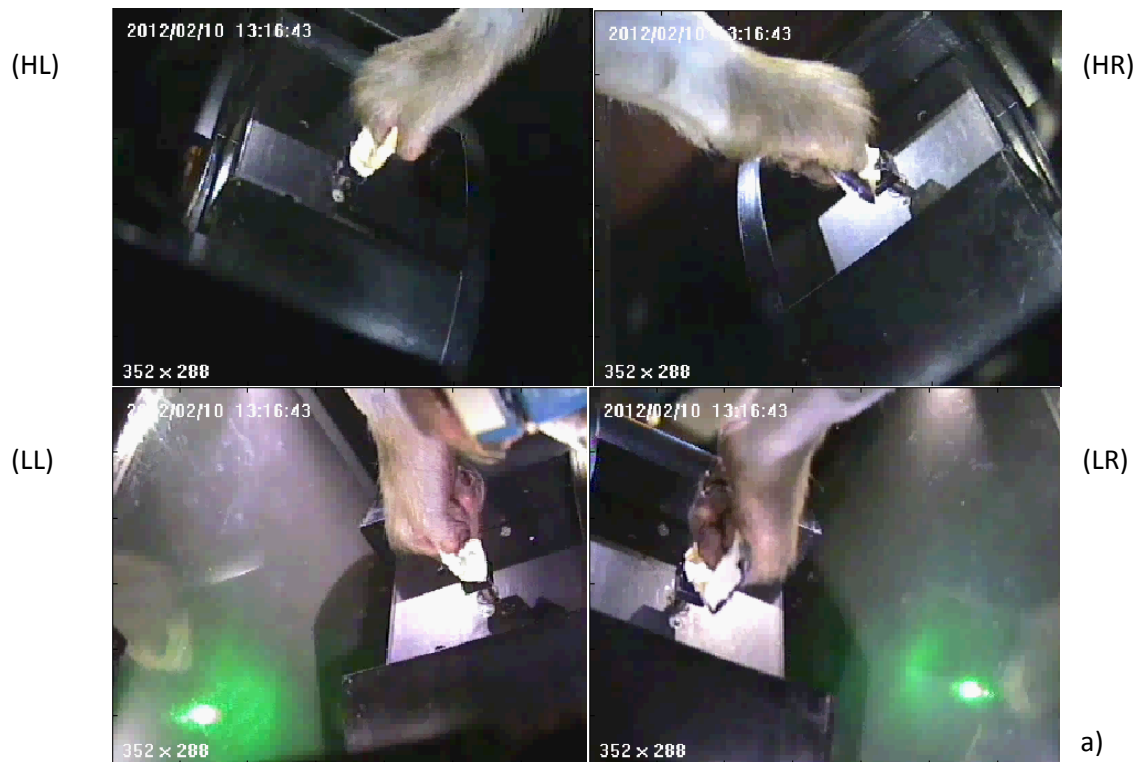


Figure VII-9. Configuration de saisie générée pour l'objet « grand anneau ». La quasi-totalité des doigts centraux (majeur et annulaire) n'a pu être reconstruite ; seules les dernières phalanges de ces doigts sont visibles. De plus l'extrémité de l'index est aussi manquante, ce qui rend impossible le calcul de son plan d'abduction/adduction (b).

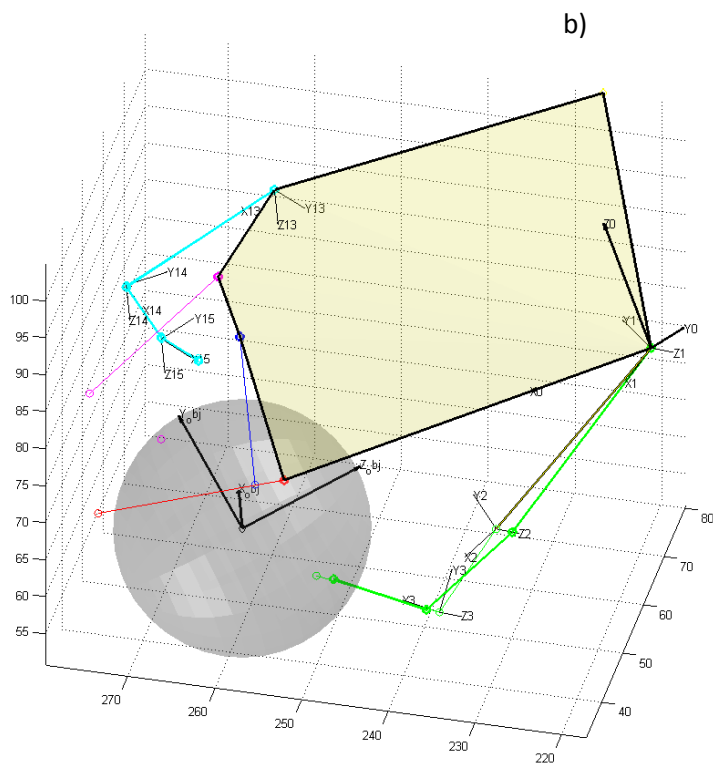


Figure VII-10. Configuration de saisie générée pour l'objet « sphère ».

Les doigts passant derrière l'objet lors de la réalisation de cette prise sa reconstruction est problématique ; seules les phalanges proximales des doigts longs sont visibles (b).

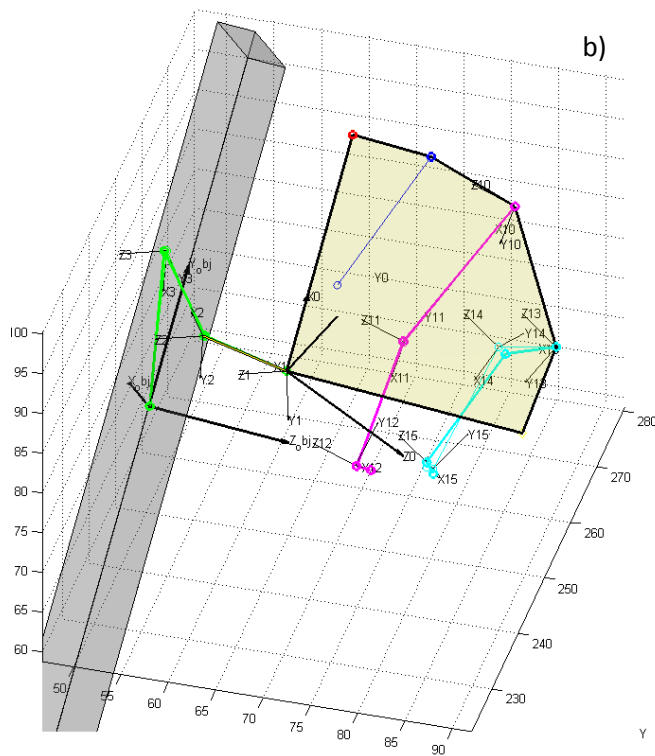


Figure VII-11. Configuration de saisie générée pour l'objet « plaque ». Comme pour le cube ici aussi l'index est entièrement caché entre l'objet, le majeur et la paume. De plus il nous manque l'articulation IPD du majeur (b).

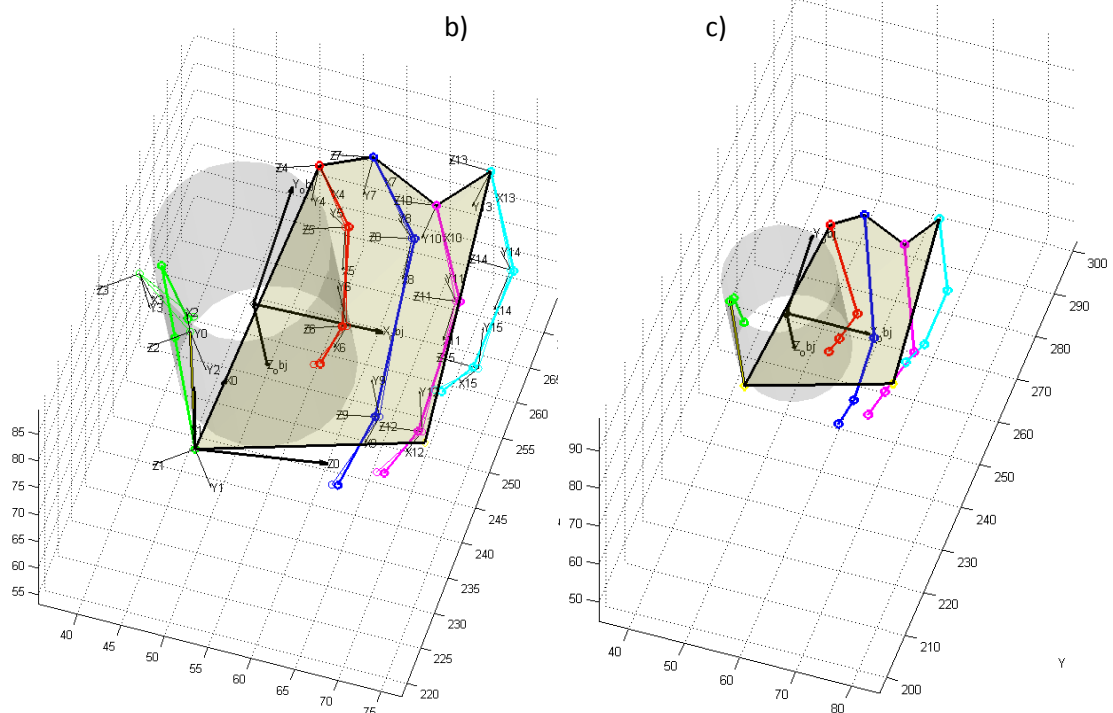


Figure VII-12. Configuration de saisie générée pour l'objet « cône ». Ici, comme pour le petit anneau, nous obtenons une configuration complète. Le processus a donc pu être mené à terme sans problème et les angles extraits.

Bibliographie

Alain. «Les idées et les Ages.» Dans *Les Passions et la Sagesse*.

Arbib, M. *Perceptual structures and distributed motor control*. Vol. 2, chez *Handbook of physiology: Section I. The nervous system*, 1449-1480. V. B. Brooks, 1981.

Arbib, M., T. Iberall, D. Lyons, et R. Linscheid. «Coordinated control programs for movement of the hand.» Dans *Hand Function and Neocortex*, 111-129. 1985.

Aristote. *Les parties des Animaux*. Vol. 4. Les Belles-Lettres-Budé.

Aydinlioglu, A., F. Akpinar, et N. Tosun. «Mathematical Relations between the Lengths of the Metacarpal Bones and Phalanges: Surgical Significance.» *The Tohoku Journal of Experimental Medicine* 185 (1998): 209-216.

Baysal, C. V. «An Intelligent Inference System for Robot Hand Optimal Grasp Preshaping.» *International Journal of Computational Intelligence Systems* 3 (2010): 656-673.

BeBionic. «bebionic-UKROW-Product-Brochure-RSLIT294-issue-2.» *bebionic-UKROW-Product-Brochure-RSLIT294-issue-2*. 2012.

Begliomini, Chiara, Andrea Caria, Wolfgang Grodd, et Umberto Castiello. «Comparing natural and constrained movements: new insights into the visuomotor control of grasping.» *Plos One* 2 (2007): 1-10.

Begliomini, Chiara, Matthew B Wall, Andrew T Smith, et Umberto Castiello. «Differential cortical activity for precision and whole-hand visually guided grasping in humans.» *The European Journal of Neuroscience* 25 (2007): 1245-1252.

Bensmail, Djamel, Johanna Robertson, Christophe Fermanian, et Agnès Roby-Brami. «Botulinum Toxin to Treat Upper-Limb Spasticity in Hemiparetic Patients: Grasp Strategies and Kinematics of Reach-to-Grasp Movements.» *Neurorehabilitation and Neural Repair* 24 (2010): 141-151.

Biagiotti, L., F. Lotti, C. Melchiorri, et G. Vassura. *How Far Is the Human Hand? A Review on Anthropomorphic Robotic End-effectors*. 2002.

Bicchi, A. «Hands for dexterous manipulation and robust grasping: A difficult road toward simplicity.» *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* 16 (2002): 652-662.

Bicchi, A., et V. Kumar. «Robotic grasping and contact: A review.» 2002. 348-353.

Biddiss, E. A., et T. T. Chau. «Upper limb prosthesis use and abandonment: A survey of the last 25 years.» *Prosthetics and Orthotics International* 31 (2007): 236-257.

Bouguet, J. «Camera Calibration Toolbox for Matlab.» *Camera Calibration Toolbox for Matlab*.

Bourg, Dominique. *Nature et technique : essai sur l'idée du progrès*. Hatier, 1997.

Brochier, T., et R. N. Lemon. «Recordings from the motor cortex during skilled grasping.» Dans *Sensorimotor control of grasping : physiology and pathophysiology*, 52-60. Nowak Dennis A, Hermsdorfer Joachim, 2009.

Brown, C. Y., et H. H. Asada. «Inter-finger coordination and postural synergies in robot hands via mechanical implementation of principal components analysis.» IEEE, 2007. 2877-2882.

- Brown, E., et al. «Universal robotic gripper based on the jamming of granular material.» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107 (2010): 18809-18814.
- Brozzoli, C., F. Pavani, C. Urquizar, L. Cardinali, et A. Farne. «Grasping actions remap peripersonal space.» *NeuroReport* 20 (2009): 913-917.
- Burnod, Y, P Grandguillaume, I Otto, S Ferraina, P B Johnson, et R Caminiti. «Visuomotor transformations underlying arm movements toward visual targets: a neural network model of cerebral cortical operations.» *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience* 12 (1992): 1435-1453.
- Butterfass, J., M. Grebenstein, H. Liu, et G. Hirzinger. «DLR-Hand II: Next generation of a dextrous robot hand.» 2001. 109-114.
- Butterworth, G., E. Verweij, et B. Hopkins. «The development of prehension in infants: Halverson revisited.» *British Journal of Developmental Psychology* 15 (1997): 223-236.
- Caffaz, A., et G. Cannata. «The design and development of the DIST-Hand dextrous gripper.» 1998. 2075-2080.
- Cardinali, L., F. Frassinetti, C. Brozzoli, C. Urquizar, A. C. Roy, et A. Farne. «Tool-use induces morphological updating of the body schema.» *Current Biology* 19 (2009): R478-R479.
- Carenzi, F., P. Bendahan, V.Y. Roschin, A. A. Frolov, P. Gorce, et M.A. Maier. «A generic neural network for multi-modal sensorimotor learning.» *Neurocomputing* 58-60 (2004): 525-533.
- Cesari, P., et K. M. Newell. «The scaling of human grip configurations.» *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 25 (1999): 927-935.
- Chalfoun, M., M. Massemjean, M. Mouhamed, M. Ouezdou, et M. Younes. «Anatomie de la main et relation tendon couple articulaire.»
- Chao, E. Y. *Biomechanics of the hand: a basic research study*. World Scientific, 1989.
- Chinello, F., S. Scheggi, F. Morbidi, et D. Prattichizzo. «KUKA Control Toolbox.» *Robotics & Automation Magazine, IEEE* 18 (2011): 69-79.
- Ciocarlie, M., C. Goldfeder, et P. Allen. «Dimensionality reduction for hand-independent dexterous robotic grasping.» 2007. 3270-3275.
- Cipriani, C., M. Controzzi, et M. C. Carrozza. «The SmartHand transradial prosthesis.» *Journal of neuroengineering and rehabilitation* 8 (2011): 29.
- Clewley, Robert H, John M Guckenheimer, et Francisco J Valero-Cuevas. «Estimating effective degrees of freedom in motor systems.» *IEEE transactions on bio-medical engineering* 55 (2008): 430-442.
- Crammond, D. J., et J. F. Kalaska. «Neuronal activity in primate parietal cortex area 5 varies with intended movement direction during an instructed-delay period.» *Experimental Brain Research* 76 (1989): 458-462.
- Crawford, J. D., W. P. Medendorp, et J. J. Marotta. «Spatial transformations for eye-hand coordination.» *Journal of neurophysiology* 92 (2004): 10-19.

Cuijpers, Raymond H., Jeroen B. J., et Eli Brenner. «On the Relation Between Object Shape and Grasping Kinematics.» *J Neurophysiol* 91 (2004): 2598-2606.

Cutkosky, M. R. «On Grasp Choice, Grasp Models and the Design of Hands for Manufacturing Tasks.» *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 5 (1989): 269-279.

Davare, M., A. Kraskov, J. C. Rothwell, et R. N. Lemon. «Interactions between areas of the cortical grasping network.» *Current Opinion in Neurobiology*, 2011.

Diftler, M.A., et al. «Robonaut 2 - The first humanoid robot in space.» IEEE, 2011. 2178-2183.

Dipietro, L., A. M. Sabatini, et P. Dario. «A survey of glove-based systems and their applications.» *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on* 38 (2008): 461-482.

Domalain, M., L. Vigouroux, F. Danion, V. Sevez, et E. Berton. «Effect of object width on precision grip force and finger posture.» *Ergonomics* 51 (2008): 1441-1453.

Dominey, P. F., P. Vindras, C. Problanc, et D. Pelisson. «Eye-hand coordination in reaching movements.» Dans *The handbook of brain theory and neural networks*, édité par MIT Press, 385-387. 1998.

Duby, C., et S. Robin. *Analyse en composantes principales*. Institut National Agronomique. 2006.

Ebner, M., et R.S. Wallace. «A direct-drive hand: design, modeling and control.» IEEE, 1995. 1668-1673.

Ehrsson, H. H., B. Rosen, A. Stocksélius, C. Ragnö, P. Kohler, et G. Lundborg. «Upper limb amputees can be induced to experience a rubber hand as their own.» *Brain* 131 (2008): 3443-3452.

Elbert, T., C. Pantev, C. Wienbruch, B. Rockstroh, et E. Taub. «Increased Cortical Representation of the Fingers of the Left Hand in String Players.» *Science* 270 (1995): 305-307.

El-Khoury, S., A. Sahbani, et P. Bidaud. «3D Object Grasp Synthesis: A Survey.» 2011.

El-Khoury, S., et A. Sahbani. «A new strategy combining empirical and analytical approaches for grasping unknown 3D objects.» *Robotics and Autonomous Systems* 58 (2010): 497-507.

ElKoura, George, et Karan Singh. «Handrix: animating the human hand.» Eurographics Association, 2003. 110-119.

Eskiizmirli, S., M. A. Maier, L. Zollo, L. Manfredi, G. Teti, et C. Laschi. «Reach and Grasp for an Anthropomorphic Robotic System based on Sensorimotor Learning.» 2006. 708-713.

Eskiizmirli, S., N. Forestier, B. Tondou, et C. Darlot. «A model of the cerebellar pathways applied to the control of a single-joint robot arm actuated by McKibben artificial muscles.» *Biological cybernetics* 86 (2002): 379-394.

Fagard, Jacqueline. *Le développement des habiletés de l'enfant : coordination bimanuelle et latéralité*. CNRS, 2001.

Fagg, A. H., et M. A. Arbib. «Modeling parietal-premotor interactions in primate control of grasping.» *Neural Networks* 11 (1998): 1277-1303.

Fernandez, A. A. «Contribution a la manipulation d'objets par une main robotique avec repositionnement des doigts.» 2007.

Fishel, J. A., et G. E. Loeb. «Bayesian Exploration for Intelligent Identification of Textures.» *Frontiers in Neurobotics* 6 (2012).

Folgheraiter, M., et G. Gini. «Blackfingers an artificial hand that copies human hand in structure, size, and function.» *Proc. IEEE Humanoids*, 2000: 4.

Franceschini, N., F. Ruffier, et J. Serres. «A Bio-Inspired Flying Robot Sheds Light on Insect Piloting Abilities.» *Current Biology* 17 (2007): 329-335.

Frank, I. E., et J. H. Friedman. «A statistical view of some chemometrics regression tools.» *Technometrics*, 1993: 109-135.

Fukaya, N., S. Toyama, T. Asfour, et R. Dillmann. «Design of the TUAT/Karlsruhe humanoid hand.» IEEE, 2000. 1754-1759.

Gaussier, P., et S. Zrehen. *Moving the frontiers between robotics and biology*. Elsevier, 1995.

Gazeau, J. P, S. Zeghloul, M. Arsicault, et J. P Lallemand. «Manipulation with the LMS mechanical hand: Strategy for fingertip manipulation task.» *Journal europeen des systemes automatisees* 36 (2002): 1205-1219.

Gazeau, J. P. «Developpement de la commande d'une main mecanique articulee a 4 doigts et 16 degres de mobilite en vue de la manipulation fine d'objets.» 2000.

Gazeau, J. P., S. Zeghloul, A. Fernandez, et M. Arsicault. «Planning 3 D regrasp operations with a polyarticulated mechanical hand.» 2007.

Gentile, G., V. I. Petkova, et H. H. Ehrsson. «Integration of Visual and Tactile Signals From the Hand in the Human Brain: An fMRI Study.» *Journal of Neurophysiology* 105 (2011): 910-922.

Gentilucci, M., L. Caselli, et C. Secchi. «Finger control in the tripod grasp.» *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation Cerebrale* 149 (2003): 351-360.

Georgopoulos, A. P., J. F. Kalaska, R. Caminiti, et J. T. Massey. «On the relations between the direction of two-dimensional arm movements and cell discharge in primate motor cortex.» *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience* 2 (1982): 1527-1537.

Ghez, C., J. Gordon, M.F. Ghilardi, et R. Sainburg. «Contribution of Vision and Perception to Accuracy in Limb Movements.» Dans *The Cognitive Neuroscience*, 549-64. 1995.

Gibson, J.J. «A Preliminary Description and Classification of Affordances.» Dans *Reasons for Realism*, 403-406. E.S. Reed & R. Jones, 1982.

Gomi, H., et M. Kawato. «Equilibrium-point control hypothesis examined by measured arm stiffness during multijoint movement.» *Science* 272 (1996): 117-120.

Goussous, F., T. Marler, et K. Abdel-Malek. «A new methodology for human grasp prediction.» *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on* 39 (2009): 369-380.

Graziano, M., G. Yap, et C. Gross. «Coding of visual space by premotor neurons.» *Science* 266 (1994): 1054-1057.

- Griffiths, H. «Treatment of the injured workman.» *The Lancet* 241 (1943): 729-733.
- Hall, Edward T. *The hidden dimension*. Anchor Books, 1990.
- Hebb, D.O. *The organization of behavior: a neuropsychological theory*. Wiley, 1949.
- Hochberg, Leigh R., et al. «Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm.» *Nature* 485 (2012): 372-375.
- Horaud, R., O. Monga, et others. *Vision par ordinateur: outils fondamentaux*. 1995.
- Iberall, T., et M. A. Arbib. «Schemas for the control of hand movements: an essay on cortical localization.» Dans *Vision and action : the control of grasping*, 204-242. Goodale Melvyn A, 1990.
- Ingram, J. N., K. P. Kording, I. S. Howard, et D. M. Wolpert. «The statistics of natural hand movements.» *Experimental Brain Research* 188 (2008): 223-236.
- Jacobsen, S., E. Iversen, D. Knutti, R. Johnson, et K. Biggers. «Design of the Utah/M.I.T. Dextrous Hand.» Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1986. 1520-1532.
- Jauregui, D.-A., et P. Horain. *Computer Vision/ Computer Graphics Collaboration Techniques*. Édité par Heidelberg. Springer Berlin, 2009.
- Jeannerod, M. «Intersegmental Coordination During Reaching at Natural Visual Objects.» Long, J. et Baddeley, A., 1981. 153-169.
- Jeannerod, M. «The neural and behavioral organization of goal-directed movements.» (Clarendon Press) 1988.
- Jeannerod, M. «The timing of natural prehension movements.» *J Mot Behav* 16 (1984): 235-54.
- Jeannerod, M. «Visuomotor channels: Their integration in goal-directed prehension.» *Human Movement Science* 18 (1999): 201-218.
- Jeannerod, M., D. Boussaoud, et P. Jacob. «Du regard au geste : comment le cerveau commande la main.» *la recherche* 309 (1998).
- Jeannerod, M., M.A. Arbib, G. Rizzolatti, et H. Sakata. «Grasping objects: the cortical mechanisms of visuomotor transformation.» *Trends in Neurosciences* 18 (1995): 314-320.
- Johansson, R.S. «Sensory control of dexterous manipulation in humans.» Dans *Hand and brain. The neurophysiology and psychology of hand movements*, édité par A.M. Wing, P. Haggard et J.R. Flanagan, 381-414. Academic Press, 1996.
- Johnson, P. B., S. Ferraina, L. Bianchi, et R. Caminiti. «Cortical Networks for Visual Reaching: Physiological and Anatomical Organization of Frontal and Parietal Lobe Arm Regions.» *Cerebral Cortex* 6 (1996): 102-119.
- Jueptner, M., K. M. Stephan, C. D. Frith, D. J. Brooks, R. S. Frackowiak, et R. E. Passingham. «Anatomy of motor learning. I. Frontal cortex and attention to action.» *Journal of neurophysiology* 77 (1997): 1313-1324.
- Just, A., Y. Rodriguez, et S. Marcel. «Hand posture classification and recognition using the modified census transform.» 2006. 351-356.

- Kadouche, R., M. Mokhtari, et M. Maier. «Modeling of the residual capability for people with severe motor disabilities: Analysis of hand posture.» *User Modeling 2005*, 2005: 151-151.
- Kandel, E. R., J. H. Schwartz, et T. M. Jessell. *Principles of neural science*. McGraw-Hill, Health Professions Division, 2000.
- Kapandji, A.I. *Anatomie fonctionnelle : schemas commentes de mecanique humaine*. Maloine, 2007.
- Kerlirzin, Y., G. Dietrich, et S. Vieilledent. *Le controle moteur: organisation et controle du mouvement*. Presses universitaires de France, 2009.
- Klatzky, R L, S J Lederman, et V A Metzger. «Identifying objects by touch: an "expert system".» *Perception & psychophysics* 37 (1985): 299-302.
- Kuiken, T. A., G. A. Dumanian, R. D. Lipschutz, L. A. Miller, et K. A. Stubblefield. «The use of targeted muscle reinnervation for improved myoelectric prosthesis control in a bilateral shoulder disarticulation amputee.» *Prosthetics and orthotics international* 28 (2004): 245-253.
- Kuiken, T. A., P. D. Marasco, B. A. Lock, R. N. Harden, et J. Dewald. «Redirection of cutaneous sensation from the hand to the chest skin of human amputees with targeted reinnervation.» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104 (2007): 20061.
- KUKA. «KUKA KR 16-2 fiche technique.» *KUKA KR 16-2 fiche technique*.
- Kwan, H. C., W. A. MacKay, J. T. Murphy, et Y. C. Wong. «Spatial organization of precentral cortex in awake primates. II. Motor outputs.» *Journal of neurophysiology* 41 (1978): 1120-1131.
- Kyriakopoulos, K.J., J. Van Riper, A. Zink, et H.E. Stephanou. «Kinematic analysis and position/force control of the Anthrobot dextrous hand.» *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B (Cybernetics)* 27 (1997): 95-104.
- Lagarde, M, et al. *Proprioception and Imitation: On the Road to Agent Individuation*. Vol. 264, chez *From Motor Learning to Interaction Learning in Robots*, 43-63. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- Lemon, R. N., et al. *Direct and indirect pathways for corticospinal control of upper limb motoneurons in the primate*. Vol. Volume 143, chez *Brain Mechanisms for the Integration of Posture and Movement*, 263-279. Elsevier, 2004.
- Li, J. W., H. Liu, et H. G. Cai. «On computing three-finger force-closure grasps of 2-D and 3-D objects.» *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* 19 (2003): 155-161.
- Li, Ying, Jiaxin L. Fu, et Nancy S. Pollard. «Data-Driven Grasp Synthesis Using Shape Matching and Task-Based Pruning.» *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 13 (2007): 732-747.
- Li, Z., et S.S. Sastry. «Task-oriented optimal grasping by multifingered robot hands.» *IEEE Journal on Robotics and Automation* 4 (1988): 32-44.
- Lotti, F., P. Tiezzi, G. Vassura, L. Biagiotti, G. Palli, et C. Melchiorri. «Development of UB Hand 3: Early Results.» *IEEE*, 2005. 4488-4493.
- MacKenzie, C. L, et T. Iberall. *The grasping hand*. North-Holland, 1994.
- Maravita, A., et A. Iriki. «Tools for the body (schema).» *Trends in Cognitive Sciences* 8 (2004): 79-86.

Mason, C. R., L. S. Theverapperuma, C. M. Hendrix, et T. J. Ebner. «Monkey hand postural synergies during reach-to-grasp in the absence of vision of the hand and object.» *Journal of neurophysiology* 91 (2004): 2826-2837.

McBride, E. D. *Disability Evaluation*. J.B. Lippincott Co. Édité par Lippincott. 1963.

Menezes, P., F. Lerasle, J. Dias, et R. Chatila. «A single camera motion capture system dedicated to gestures imitation.» IEEE, 2005. 430-435.

Miller, A. T., S. Knoop, H. I. Christensen, et P. K. Allen. «Automatic grasp planning using shape primitives.» 2003. 1824-1829.

Millstein, S. G., H. Heger, et G. A. Hunter. «Prosthetic use in adult upper limb amputees: a comparison of the body powered and electrically powered prostheses.» *Prosthetics and orthotics international* 10 (1986): 27-34.

Modha, D. S., et R. Singh. «Network architecture of the long-distance pathways in the macaque brain.» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107 (2010): 13485-13490.

Monestier, Jacques. «La prothese intelligente.» *Journées d'Histoire des Maladies des Os et des Articulations*, 2009.

Moore, B., E. Ugur, et E. Oztop. «Biologically inspired robot grasping through human-in-the-loop robot control.» 2010.

Mori, M., K. F. MacDorman, et T. Minato. «The Uncanny Valley.» 1970: 33-35.

Moritz, C. T., S. I. Perlmutter, et E. E. Fetz. «Direct control of paralysed muscles by cortical neurons.» *Nature* 456 (2008): 639-642.

Nakamura, K., K. Sakai, et O. Hikosaka. «Neuronal activity in medial frontal cortex during learning of sequential procedures.» *Journal of neurophysiology* 80 (1998): 2671-2687.

Namiki, A., Y. Imai, M. Ishikawa, et M. Kaneko. «Development of a high-speed multifingered hand system and its application to catching.» 2003. 2666-2671.

Napier, J. R. «The prehensile movements of the human hand.» *The Journal of Bone and Surgery* 38 B (1956): 902-913.

Navarro, X., T. B. Krueger, N. Lago, S. Micera, T. Stieglitz, et P. Dario. «A critical review of interfaces with the peripheral nervous system for the control of neuroprostheses and hybrid bionic systems.» *Journal of the Peripheral Nervous System* 10 (2005): 229-258.

Obayashi, S., et al. «Functional Brain Mapping of Monkey Tool Use.» *NeuroImage* 14 (2001): 853-861.

Okada, Tokuji. «Computer Control of Multijointed Finger System for Precise Object-Handling.» *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 12 (1982): 289-299.

Okamura, A.M., N. Smaby, et M.R. Cutkosky. «An overview of dexterous manipulation.» IEEE, 2000. 255-262.

OttoBock. «Axon-Bus Prosthetic System with Michelangelo Hand.» *Axon-Bus Prosthetic System with Michelangelo Hand*.

OttoBock. «SensorHand Speed datasheet.» *SensorHand Speed datasheet*. 2012.

- OttoBock. «The Feeling Hand Prosthesis.» *The Feeling Hand Prosthesis*. Nano Circle CrÃ©dit Suisse.
- OttoBock, J. Romero, CarlHenrik E., et D. Kragic. «Human Grasping Database.» *Human Grasping Database*.
- Ouanezar, S., S. Eskiizmirli, et M. A. Maier. «Asynchronous decoding of finger position and of EMG during precision grip using CM cell activity: Application to robot control.» *Journal of Integrative Neuroscience* 10 (2011): 489-511.
- Oztop, E., et M. A. Arbib. «Schema design and implementation of the grasp-related mirror neuron system.» *Biological Cybernetics* 87 (2002): 116-140.
- Oztop, E., N. S. Bradley, et M. A. Arbib. «Infant grasp learning: a computational model.» *Experimental Brain Research* 158 (2004).
- Paetsch, W., et G. von Wichert. «Solving insertion tasks with a multifingered gripper by fumbling.» IEEE Comput. Soc. Press, 1993. 173-179.
- Paetsch, W., et M. Kaneko. «A three fingered, multijointed gripper for experimental use.» IEEE, 1990. 853-858.
- Pascual-Leone, A., M. Peris, J. M. Tormos, A. P. Pascual, et M. D. Catala. «Reorganization of human cortical motor output maps following traumatic forearm amputation.» *Neuroreport* 7 (1996): 2068-2070.
- Paulignan, Y., C. MacKenzie, R. Marteniuk, et M. Jeannerod. «Selective perturbation of visual input during prehension movements I The effects of changing object position.» *Experimental Brain Research* 83 (1991).
- Paulignan, Y., M. Jeannerod, C. MacKenzie, et R. Marteniuk. «Selective perturbation of visual input during prehension movements II The effects of changing object size.» *Experimental Brain Research* 87 (1991).
- Paulignan, Y., V.G. Frak, I. Toni, et M. Jeannerod. «Influence of object position and size on human prehension movements.» *Exp Brain Res* 114 (1997): 226-34.
- Peloso, R., A. Miller, P. Allen, et T. Jebara. «An SVM learning approach to robotic grasping.» 2004. 3512-3518.
- Pfeiffer, F. «Grasping with hydraulic fingers-an example of mechatronics.» *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 1 (1996): 158-167.
- Pitarch, E. P., J. Yang, et K. A. Abdel-Malek. «SANTOS Hand: A 25 Degree-Of-Freedom Model.» *SAE International*, 2005.
- Poliakov, Andrew V., et Marc H. Schieber. «Limited Functional Grouping of Neurons in the Motor Cortex Hand Area During Individuated Finger Movements: A Cluster Analysis.» *Journal of Neurophysiology* 82 (1999): 3488-3505.
- Ratib, Osman, Antoine Rosset, et Joris Heuberger. *OsiriX the Pocket Guide 2nd Ed.*
- RealLifeSkin. «Hand & Finger Prosthetics - Custom Protheses by RealLifeSkin.» *Hand & Finger Prosthetics - Custom Protheses by RealLifeSkin*.

Rezzoug, Nasser, et Philippe Gorce. «Prediction of fingers posture using artificial neural networks.» *Journal of Biomechanics* 41 (2008): 2743-2749.

Rijkema, H., et M. Girard. «Computer animation of knowledge-based human grasping.» 1991. 339-348.

Roby-Brami, Bennis N. «Hand Orientation for grasping depends on the direction of the reaching movement.» *Brain Research* 869 (2000): 121-129.

Romero, J., H. Kjellstrom, et D. Kragic. «Hands in action: Real-time 3D reconstruction of hands in interaction with objects.» 2010. 458-463.

Roosendaal, Ton, et Blender Foundation. *The essential Blender : guide to 3D creation with the open source suite Blender*. No Starch Press, 2007.

Rosenbaum, D. A., R. J. Meulenbroek, J. Vaughan, et C. Jansen. «Posture-based motion planning: Applications to grasping.» *Psychological Review* 108 (2001): 709.

Sahbani, Anis, et Sahar El-Khoury. «A hybrid approach for grasping 3D objects.» IEEE, 2009. 1272-1277.

Salisbury, J. K. *Kinematic and force analysis of articulated hands*. John Wiley & Sons, Inc., 1985.

Sanes, J. N., et J. P. Donoghue. «Plasticity and Primary Motor Cortex.» *Annual Review of Neuroscience* 23 (2000): 393-415.

Santello, M., et J. F. Soechting. «Gradual Molding of the Hand to Object Contours.» *Journal of Neurophysiology* 79 (1998): 1307-1320.

Santello, M., et M. Flanders. «Postural Hand Synergies for Tool Use.» *The Journal of Neuroscience* 18(23) (1998): 10105-10115.

Santos, V.J., et F.J. Valero-Cuevas. «Reported Anatomical Variability Naturally Leads to Multimodal Distributions of Denavit-Hartenberg Parameters for the Human Thumb.» *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 53 (2006): 155-163.

Sanz, C. M., et D. B. Morgan. «Flexible and Persistent Tool-using Strategies in Honey-gathering by Wild Chimpanzees.» *International Journal of Primatology* 30 (2009): 411-427.

Sartori, L., E. Straulino, et U. Castiello. «How Objects Are Grasped: The Interplay between Affordances and End-Goals.» Édité par Alessio Avenanti. *PLoS ONE* 6 (2011): e25203.

Sausser, E. L., B. D. Argall, G. Metta, et A. G. Billard. «Iterative learning of grasp adaptation through human corrections.» *Robotics and Autonomous Systems* 60 (2012): 55-71.

Saut, J. P., A. Sahbani, et V. Perdereau. «Planification de Taches de Manipulation Fine d'Objets Rigides.»

Savescu, A. «Analyse et modelisation du mouvement de prehension.» Université Claude Bernard - Lyon I, 2006.

Schaal, S., C. G. Atkeson, et S. Vijayakumar. «Scalable techniques from nonparametric statistics for real time robot learning.» *Applied Intelligence* 17 (2002): 49-60.

- Schaal, S., S. Vijayakumar, et C. G. Atkeson. «Local dimensionality reduction.» *Advances in neural information processing systems*, 1998: 633-639.
- Schieber, M. H., et M. Santello. «Hand function: peripheral and central constraints on performance.» *Journal of Applied Physiology* 96 (2004): 2293-2300.
- Schlesinger, G. «Der Mechanische Aufbau der kunstlichen Glieder [La structure mecanique des membres artificiels].» Dans *Ersatzglieder und Arbeitshilfen fur Kriensbeschadiete und Unfallverletzte*, 21-600. M. Borchardt et al, 1919.
- Schot, Willemijn D, Eli Brenner, et Jeroen B J. «Posture of the arm when grasping spheres to place them elsewhere.» *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation Cerebrale* 204 (2010): 163-171.
- Schulz, S., C. Pylatiuk, et G. Bretthauer. «A new ultralight anthropomorphic hand.» IEEE, 2001. 2437-2441.
- Schweighofer, N, M. Arbib, et P. Dominey. «A model of the cerebellum in adaptive control of saccadic gain. II. Simulation results.» *Biological cybernetics* 75 (1996b): 29-36.
- Schweighofer, N., M. Arbib, et P. Dominey. «A model of the cerebellum in adaptive control of saccadic gain I. The model and its biological substrate.» *Biological Cybernetics* 75 (1996a): 19-28.
- Serra. «Serra Soldadura.» *Serra Soldadura*.
- Shadmehr, R., et S. P. Wise. *The computational neurobiology of reaching and pointing : a foundation for motor learning*. MIT Press, 2005.
- ShadowRobotCompany. «Shadow Dexterous Hand C6P6: Technical Specification.» *Shadow Dexterous Hand C6P6: Technical Specification*. 2010.
- Shastri, S. V., et T. Iberall. «Dextrous robot hands.» Springer-Verlag, 1990.
- Shiokata, D., A. Namiki, et M. Ishikawa. «Robot dribbling using a high-speed multifingered hand and a high-speed vision system.» 2005. 2097-2102.
- Snyder, Richard G. *Anthropometry of infants, children and youths to age 18 for product safety design. Final report*. 1977.
- Spinks, R. L., A. Kraskov, T. Brochier, M. A. Umiltà, et R. N. Lemon. «Selectivity for Grasp in Local Field Potential and Single Neuron Activity Recorded Simultaneously from M1 and F5 in the Awake Macaque Monkey.» *J. Neurosci.* 28 (2008): 10961-10971.
- Spong, M. W, S. Hutchinson, et M. Vidyasagar. *Robot modeling and control*. Wiley New Jersey, 2006.
- Steil, J.J., F. Rothling, R. Haschke, et H. Ritter. «Situating robot learning for multi-modal instruction and imitation of grasping.» *Robotics and Autonomous Systems* 47 (2004): 129-141.
- Sueda, S., A. Kaufman, et D. K. Pai. «Musculotendon simulation for hand animation.» *ACM Trans. Graph.* 27 (2008): 1-8.
- Sugaiwa, T., Y. Yamaguchi, H. Iwata, et S. Sugano. «Dexterous hand-arm coordinated manipulation using active body-environment contact.» 2009. 4168-4173.

Tagliabue, M., et J. McIntyre. «Necessity is the mother of invention: reconstructing missing sensory information in multiple, concurrent reference frames for eye-hand coordination.» *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience* 31 (2011): 1397-1409.

Taylor, D. M., S. I. H., et A. B. Schwartz. «Direct cortical control of 3D neuroprosthetic devices.» *Science* 296 (2002): 1829.

Tetsuya, M., K. Haruhisa, Y. Keisuke, T. Jun, et I. Satoshi. «Anthropomorphic Robot Hand Gifu Hand III and Real Time Control System.» *Nippon Kikai Gakkai Robotikusu, Mekatoronikusu Koenkai Koen Ronbunshu* 2002 (2002): 2P2.F02.

Thakur, P. H., A. J. Bastian, et S. S. Hsiao. «Multidigit Movement Synergies of the Human Hand in an Unconstrained Haptic Exploration Task.» *The Journal of Neuroscience* 28 (2008): 1271-1281.

TouchBionics. «Document library.» *Document library*.

Touvet, F., N. Daoud, J.-P. Gazeau, S. Zeghloul, M. Maier, et S. Eskiizmirli. «A biomimetic reach and grasp approach for mechanical hands.» *Robotics and Autonomous Systems*, 2011.

Touvet, Francois, Eskiizmirli, M.A Maier, et Roby-Brami. «Contribution of object properties and grasp orientation to hand reaching position.» (en soumission) 2013.

Townsend, W. «The BarrettHand grasper - programmably flexible part handling and assembly.» *Industrial Robot: An International Journal* 27 (2000): 181-188.

Turner, Michael Leo. *Programming dexterous manipulation by demonstration*. 2001.

Umiltà, M. A., T. Brochier, R. L. Spinks, et R. N. Lemon. «Simultaneous recording of macaque premotor and primary motor cortex neuronal populations reveals different functional contributions to visuomotor grasp.» *Journal of neurophysiology* 98 (2007): 488-501.

Valero-Cuevas, F.J. «Applying principles of robotics to understand the biomechanics, neuromuscular control and clinical rehabilitation of human digits.» IEEE, 2000. 270-275.

van_Nierop, O. A., A. van_der_Helm, K. J. Overbeeke, et T. J.P. Djajadiningrat. «A natural human hand model.» *The Visual Computer* 24 (2007): 31-44.

Vijayakumar, S., A. D'souza, et S. Schaal. «Incremental online learning in high dimensions.» *Neural Computation* 17 (2005): 2602-2634.

Vijayakumar, S., et S. Schaal. «Locally weighted projection regression: An $O(n)$ algorithm for incremental real time learning in high dimensional space.» 2000. 288-293.

Waldert, S., et al. «Hand movement direction decoded from MEG and EEG.» *The Journal of neuroscience* 28 (2008): 1000-1008.

Walters, M. L., K. Dautenhahn, R. Te Boekhorst, K. L. Koay, D. S. Syrdal, et C. L. Nehaniv. «An empirical framework for human-robot proxemics.» 2009. 144-149.

Waryck, B. «Comparison Of Two Myoelectric Multi-Articulating Prosthetic Hands.» 2011.

Weiss, T., W. H.R. Miltner, R. Huonker, R. Friedel, I. Schmidt, et E. Taub. «Rapid functional plasticity of the somatosensory cortex after finger amputation.» *Experimental Brain Research* 134 (2000): 199-203.

Wing, A. M., A. Turton, et C. Fraser. «Grasp size and accuracy of approach in reaching.» *Journal of Motor Behavior* 18 (1986): 245-260.

Wing, A. M., P. Haggard, et J. R. Flanagan. *Hand and brain: the neurophysiology and psychology of hand movements*. Academic Pr, 1996.

Wold, H. «Soft modeling by latent variables: the nonlinear iterative partial least squares approach.» *Perspectives in probability and statistics, papers in honour of MS Bartlett*, 1975: 520-540.

Woodworth, R. S. «Accuracy of voluntary movement.» *The Psychological Review: Monograph Supplements* 3 (1899): i.

Woolsey, C. N., P. H. Settlage, D. R. Meyer, W. Sencer, T. Pinto Hamuy, et A. M. Travis. «Patterns of localization in precentral and "supplementary" motor areas and their relation to the concept of a premotor area.» *Research publications - Association for Research in Nervous and Mental Disease* 30 (1952): 238-264.

Yamagiwa, J., T. Yumoto, M. Ndunda, et T. Maruhashi. «Evidence of tool-use by chimpanzees (*Pan troglodytes schweinfurthii*) for digging out a bee-nest in the Kahuzi-biega national park, Zaire.» *Primates* 29 (1988): 405-411.

Yamane, K., D. Fukuda, et Y. Nakamura. «Markerless motion capture with structure estimation capability.» *Journal of Robotics and Mechatronics* 20 (2010): 322.

Zatsiorsky, V. M., et M. L. Latash. «Multifinger prehension: an overview.» *Journal of motor behavior* 40 (2008): 446-476.

Zollo, L., et al. «A Bio-inspired Neuro-Controller for an Anthropomorphic Head-Arm Robotic System.» 2005. 12-17.

Zollo, L., et al. «An Anthropomorphic Robotic Platform for Progressive and Adaptive Sensorimotor Learning.» *Advanced Robotics* 22 (2008): 91-118.