



HAL
open science

Analyse et simulation cinématique du mouvement du bras lors de la manipulation d'un objet pour la simulation ergonomique à l'aide d'un mannequin numérique

Julien Lardy

► To cite this version:

Julien Lardy. Analyse et simulation cinématique du mouvement du bras lors de la manipulation d'un objet pour la simulation ergonomique à l'aide d'un mannequin numérique. Biomécanique [physics.med-ph]. Université Claude Bernard - Lyon I, 2013. Français. NNT : 2013LYO10018 . tel-01355598

HAL Id: tel-01355598

<https://theses.hal.science/tel-01355598>

Submitted on 23 Aug 2016

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

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

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON

Présentée devant
L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1

ECOLE DOCTORALE MEGA

Pour l'obtention du

DIPLOME DE DOCTORAT
(arrêté du 7 août 2006)

Spécialité : Génie Mécanique

Soutenue publiquement le 5 février 2013

par

Julien LARDY

**Analyse et simulation cinématique du mouvement
du bras lors de la manipulation d'un objet pour la
simulation ergonomique à l'aide d'un mannequin
numérique**

Directeur de thèse : Xuguang WANG

Jury :

Rapporteur	P. GORCE	Professeur (Université du Sud Toulon Var)
Rapporteur	F. MULTON	Professeur (Université Rennes 2)
Examineur	L. CHÈZE	Professeur (Université Claude Bernard Lyon 1)
Examineur	A. SAVESCU	Responsable d'étude (INRS, Nancy)
Examineur	X. WANG	Directeur de recherche (Ifsttar, Bron)
Examineur	G. BEURIER	Chargé de recherche (Ifsttar, Bron)

“Anyone can memorize things, but the important thing is to understand it.”

Remerciements

Avant d'entamer ce manuscrit, je souhaiterais évoquer quelques noms aux futurs lecteurs (s'il en est), sans qui ce travail n'aurait pas été possible, que ce soit par une aide concrète apportée ou seulement par leur présence.

Ainsi, je voudrais remercier dans un premier temps Xuguang WANG et Georges BEURIER pour leur encadrement, leur rigueur et leur sens du détail. Le travail à leurs côtés m'aura sans nul doute rendu plus rigoureux.

Je tiens également à remercier messieurs Philippe GORCE et Franck MULTON pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce manuscrit et d'apporter un œil critique objectif à ce travail. De même, je souhaiterais remercier ici mesdames Laurence CHEZE et Adriana SAVESCU pour avoir accepté de participer au jury final.

Ce travail n'aurait pas non plus été possible sans le LBMC et l'Ifsttar. Je les remercie donc de m'avoir permis de travailler sur ce sujet, grâce à leur support financier et technique. Merci à l'ensemble de l'équipe du LBMC d'avoir partagé ces quelques années avec moi. Je souhaiterais également remercier la Région Rhône-Alpes pour m'avoir offert l'opportunité de passer 6 mois aux Etats-Unis dans le Motor Control Lab de Mark LATASH. Merci également à ce dernier pour m'avoir accueilli sans conditions dans son laboratoire et pour m'avoir introduit à de nombreuses personnes très enrichissantes sous tous points de vue. Bien que les travaux effectués durant cette période ne soient pas inclus dans ce manuscrit, ces derniers restent prometteurs et ne manqueront pas de m'occuper pendant quelques temps.

Merci également à Adriana SAVESCU pour la collecte, et Benjamin CONDI pour le prétraitement (reconstruction des mouvements) des données utilisées dans ce manuscrit.

Beaucoup de gens le savent, mais il est bon de rappeler que si une thèse arrive à son terme, ce n'est sûrement pas dû uniquement aux noms mentionnés sur la couverture. De nombreuses

personnes de l'ombre dans le laboratoire ont permis cette réalisation, que ce soit au travers de discussions constructives, de petits (ou plus gros) coups de main ou encore tout simplement en permettant de se changer les idées pour éviter la surchauffe. Je voudrais donc remercier particulièrement Romain, dit « Rominou », un co-bureau qui aura pu montrer durant cette thèse toutes les facettes susmentionnées, Thomas et Sonia, qui m'ont bien souvent aidé ou remonté le moral, les filles d'à côté : Flo, Dodo, Clém, Jeannette, Cindy, Elo, Ju N., Ju C., Fabien, Xav, Anurag, pour les pauses badminton, ou les pauses tout court. Désolé si j'en oublie, mais un grand merci à tous.

Bien sûr, j'ai également reçu du soutien d'amis proches ou éloignés et je voudrais donc les en remercier : Alex, ALD, Cha, Clé et Alex, Lulu et Oliv', Dada, Les Grands, Sophie, Titia, Greg et Margaux, Tarkesh, Vlad and others from the EuroClub, merci à tous !

Merci également à ma famille, d'origine ou belle-famille. Vous m'avez bien supporté du début à la fin et vous pouvez être fiers de vous !

Enfin, une spéciale dédicace à celle qui aurait pu rentrer dans l'ensemble des paragraphes précédents. Tu m'as encouragé à me lancer, conseillé quand je ne trouvais pas de solutions, remonté le moral quand il était au plus bas, corrigé mes fautes d'orthographe, supporté quand j'ai été désagréable ou quelque peu stressé (oui c'est un euphémisme...). Pour toutes ces raisons, tu ne peux que mériter ton nom en bas de cette page, en guise de dédicace. Amie, famille en même temps, tout ce que j'espère, c'est pouvoir être utile pour toi dans ta thèse autant que tu l'as été pour moi dans la mienne. A toi, Lau.

Table des matières

Liste des figures	v
Liste des tableaux	vii
1 Introduction	1
1.1. Contexte	1
1.2. Problématique scientifique	3
1.3. Plan.....	4
2 Etat de l'art.....	5
2.1. Introduction	5
2.2. Le membre supérieur : un système redondant	6
2.2.1. Rappels sur le membre supérieur	6
2.2.2. Une redondance multi-échelle.....	7
2.3. Contrôle moteur et gestion de la redondance	7
2.3.1. Redondance versus abondance.....	7
2.3.2. Contrôle moteur et SNC.....	8
2.3.3. Préhension et canaux visuo-moteurs	9
2.4. Effets de la tâche sur le geste de manipulation.....	10
2.4.1. Atteinte.....	11
2.4.2. Saisie.....	12
2.4.3. Manipulation d'objets	14
2.5. Méthodes de simulation de mouvement	15
2.5.1. Méthodes basées sur des connaissances	15
2.5.2. Méthodes basées sur des données	20
2.5.3. Méthodes hybrides	22
2.6. Synthèse	23
3 Investigation expérimentale des effets de l'amplitude de rotation sur le mouvement du bras.....	25
3.1. Introduction	25
3.2. Matériel et méthode	26
3.2.1. Protocole expérimental	26
3.2.2. Systèmes de capture et de reconstruction du mouvement	27

3.2.3. Définition des variables étudiées	29
3.2.4. Analyse statistique	33
3.3. Résultats.....	33
3.3.1. Caractéristiques temporelles de l’atteinte	33
3.3.2. Caractéristiques temporelles de la phase de manipulation	33
3.3.3. Position et posture de saisie	35
3.3.4. Posture de fin de manipulation.....	39
3.3.5. Evolution des degrés de liberté du bras au cours de la manipulation.....	40
3.4. Discussions	41
3.4.1. Caractéristiques temporelles de l’atteinte et de la manipulation	42
3.4.2. Implications au contrôle postural	44
4 Analyse du mouvement de manipulation par simulation en prenant en compte les butées articulaires	47
4.1. Méthode de simulation de l’espace des postures admissibles par les butées articulaires	48
4.1.1. Rappel du principe de détection des butées articulaires	48
4.1.2. Méthode de simulation des postures admissibles.....	48
4.2. Résultats.....	51
4.2.1. Marges de pivot.....	51
4.2.2. Amplitude de rotation maximale de l’objet.....	58
4.3. Discussion.....	64
5 Vers un modèle de simulation de mouvement du bras pour une tâche de manipulation d’objet.....	67
5.1. Propositions d’algorithmes de simulation	67
5.1.1. Principe général de l’algorithme	67
5.1.2. Détermination de la posture de saisie.....	70
5.2. Résultats.....	72
5.2.1. Simulation de la posture de saisie	72
5.2.2. Mouvement de rotation et posture finale atteinte	81
5.3. Discussions	83
6 Conclusion générale et perspectives	85
6.1. Principales contributions.....	85
6.2. Limitations et perspectives.....	87
Bibliographie	89

Annexes.....	99
Publications associées	105

Liste des figures

Figure 3-1. Situation de repos des expérimentations de rotation de sphère.	27
Figure 3-2. Positionnement des marqueurs sur le sujet.....	28
Figure 3-3. Principe de détection des phases.....	30
Figure 3-4. Description de la simplification des degrés de liberté du bras.	31
Figure 3-5. Répartition des points de contact au moment de la saisie en fonction du sens de rotation.	36
Figure 3-6. Zones de saisie en fonction de l'amplitude et du sens de rotation.	36
Figure 3-7. Moyennes et écarts types des angles PIV et SUP au début de la rotation en fonction de l'amplitude.	38
Figure 3-8. Moyennes et écarts types des angles PIV et SUP en fin de rotation en fonction de l'amplitude.....	40
Figure 3-9. Différence normalisée des angles PIV et SUP entre le début et la fin de rotation en fonction de l'amplitude de rotation	41
Figure 4-1. Représentation des positions extrêmes du coude autorisées par les limites articulaires.....	50
Figure 4-2. Comparaison des marges totales de pivot moyennes au début et en fin de rotation.	51
Figure 4-3. Marges de pivot négatives et positives moyennes au début de la rotation de l'objet	52
Figure 4-4. Marges de pivot négatives et positives moyennes en fin de rotation de l'objet	52
Figure 4-5. Effet de l'attitude de main sur la marge totale de pivot.	54
Figure 4-6. Zones de saisie explorées au cours de la simulation des capacités de mouvement.	55
Figure 4-7. Représentation du calcul de l'attitude de main référence.....	56
Figure 4-8. Marge de pivot en fonction de la position de saisie.....	57

Figure 4-9. Amplitudes maximales de rotation de l'objet en fonction de l'angle de pivot initial pour un sujet type.....	59
Figure 4-10. Amplitudes maximales de rotation en fonction de l'attitude de main pour un sujet type.	61
Figure 4-11. Amplitude maximale de rotation simulée dans les sens antihoraire et horaire	63
Figure 5-1. Visualisation du principe général de simulation du mouvement de manipulation	68
Figure 5-2. Points de saisie simulés en considérant une maximisation de la marge de mouvement finale.....	73
Figure 5-3. Points de saisie simulés en considérant une maximisation du compromis entre les confort initial et final.....	74
Figure 5-4. Points de saisie simulés en considérant le milieu de la zone des points de contact possibles.....	75
Figure 5-5. Comparaison des angles du bras réels et simulés en saisissant au milieu de la zone possible	76
Figure 5-6. Marges de mouvement de début et fin de rotation réelles et simulées en considérant une saisie au niveau du barycentre de la zone admissible.	77
Figure 5-7. Représentation de différents points de saisie simulés en considérant la variabilité du mouvement.....	78
Figure 5-8. Evolution des marges de pivot des postures simulées en début et en fin de rotation.	80
Figure 5-9. Comparaison de l'évolution des angles PIV et SUP réels et simulés pour une tâche de rotation de 270° dans le sens antihoraire	82

Liste des tableaux

Tableau 3-1. Caractéristiques spatio-temporelles de l'atteinte en fonction de l'amplitude de rotation..	34
Tableau 3-2. Caractéristiques temporelles de la phase de manipulation.	35
Tableau 3-3. Evaluation de la variabilité intra-individuelle	39
Tableau 4-1. Attitudes de main offrant une marge de pivot maximale.	55
Tableau 4-2. Capacité maximale de rotation de l'objet en fonction de l'angle initial de pivot.	59
Tableau 4-3. Capacité maximale de rotation en fonction de l'attitude de main.	62
Tableau 5-1. Comparaison des angles PIV et SUP de saisie réels et simulés en incluant de la variabilité à la posture simulée.	79
Tableau 5-2. Comparaison des marges de mouvement simulées en début et fin de rotation par rapport aux données expérimentales.	81

1 Introduction

1.1. Contexte

D'après le IV^e congrès international d'ergonomie (1969), « l'ergonomie est l'étude scientifique de la relation entre l'Homme et ses moyens, méthodes et milieux de travail ». Plus tard A. Wisner compléta cette définition en affirmant que l'ergonomie est « nécessaire pour concevoir des outils, des machines, et des dispositifs qui puissent être utilisés avec le maximum de confort, de sécurité et d'efficacité » (Wisner, 1995). C'est ainsi que dans le domaine industriel, l'ergonomie s'applique à la conception de produits, à l'étude des processus de fabrication et aux risques associés à ces mêmes processus. Dans le cadre de l'évaluation ergonomique d'une chaîne de production, les tâches manuelles restent encore nombreuses malgré la part grandissante donnée aux machines. Dès lors, il est nécessaire de limiter les risques de troubles musculo-squelettiques (TMS) associés à ces tâches manuelles, en étant capable, en amont, d'estimer la faisabilité d'une tâche donnée et les risques qui y sont associés. La simulation ergonomique permet de répondre à ce besoin en faisant appel aux techniques de simulation numérique pour évaluer l'ergonomie d'un produit ou d'un poste de travail sous forme de maquettage numérique. Les mannequins numériques (« Digital Human Model » - DHM) font partie des outils utilisés dans la simulation numérique. Ils visent à représenter le futur opérateur, simuler son activité et évaluer ses interactions avec son environnement pour en déduire des informations sur les contraintes subies. L'intérêt majeur d'un tel outil est de diminuer le temps de conception, et ainsi son coût (Feyen et al., 2000 ; Chaffin, 2005). L'ensemble des derniers développements et applications des mannequins numériques est décrit plus en détail par Duffy dans un livre paru en 2009 (Duffy, 2009).

Parmi les nombreuses fonctionnalités désirées par les utilisateurs de mannequins numériques, il ressort un besoin important sur la capacité à simuler des postures ou mouvements d'une façon réaliste, dans le cas d'environnements parfois contraints, avec le minimum de descripteurs de la tâche à simuler (Chaffin, 2005 ; Chaffin, 2009). Cette qualité est nécessaire, par exemple, pour évaluer une capacité d'atteinte ou de manœuvrabilité d'une commande. Prenons par exemple le cas concret d'un changement d'une ampoule de phare de

voiture (évoqué par le constructeur Renault). Le mouvement complet pour retirer l'ampoule défectueuse consiste à : atteindre et saisir l'ampoule ; la desserrer et la retirer de son emplacement d'origine. La simulation d'un tel mouvement implique d'être capable de simuler chacune de ces étapes en prenant en compte les contraintes physiques du véhicule, et de les relier afin d'obtenir un mouvement comparable à un mouvement naturel, dans sa globalité. Or, les capacités de simulation des DHM existants ne permettent pas de simuler facilement des mouvements complexes tels que des tâches manuelles comme dans l'exemple choisi (Delleman et al., 2004 ; Lämkkull et al., 2009 ; Bertilsson et al., 2010). Cela s'explique par la complexité du problème de simulation associé aux tâches manuelles : le corps humain possède un nombre important de degrés de liberté (ddl), en particulier au niveau du membre supérieur incluant la main et des doigts. Ainsi, le corps est qualifié de redondant pour la majeure partie des tâches qui lui sont associées. C'est-à-dire qu'il possède un nombre de ddl supérieur aux contraintes imposées par la tâche. Ceci a pour conséquence une infinité de façons de réaliser cette dernière. Dès lors, afin de pouvoir estimer la faisabilité d'une tâche, nous devons être en mesure de déterminer quelle solution choisir parmi l'ensemble de ces possibilités.

Il apparaît donc le besoin d'un outil de simulation de mouvement pouvant résoudre ce problème de redondance. Dans ce contexte, de nombreux progrès ont été permis dans le domaine de la simulation de mouvement ces dernières années grâce à l'avancée rapide des méthodes de capture de mouvement. Cette méthodologie a permis, dans des domaines d'application bien spécifiques, la création de bases de données de mouvements ou de postures à évaluer. C'est le cas en particulier dans le domaine de la conception d'habitacles de voiture. Ainsi, l'Ifsttar a aidé le constructeur Renault à constituer une importante base de données sur des mouvements allant du simple geste d'atteinte de bouton (Wang et al., 2006) jusqu'à des mouvements d'entrée/sortie de véhicule (Monnier et al., 2006 ; Chateauroux et al., 2007). A partir de cela, une méthode de simulation de mouvement à partir d'une base de données (« data-based ») a été développée et implémentée dans le logiciel RPx (Monnier et al., 2009b), toujours en collaboration avec Renault. Cette méthode repose sur la modification d'un mouvement préenregistré similaire au scénario de simulation en termes d'anthropométrie du sujet et de caractéristiques de la tâche (voir (Park et al., 2004) ou (Monnier, 2004) pour une description détaillée de la méthode). Cependant, comme toutes les méthodes basées sur données, la méthode RPx souffre de la difficulté d'étendre la simulation au-delà du domaine

expérimental dans lequel les données ont été collectées. Dès lors, si l'on s'intéresse à une tâche manuelle, il semble difficile de posséder une base de données couvrant l'ensemble des possibilités existantes d'objets et de tâches associées. Pour pallier ce problème, Wang a proposé une méthode de simulation hybride (Wang et al., 2008) combinant les approches basées sur données et celles basées sur des connaissances (« knowledge-based »). L'approche basée sur connaissances suppose que les stratégies de contrôle de mouvement soient connues sous forme de critères d'optimisation ou de règles heuristiques. L'identification de ces connaissances passe alors par des observations expérimentales. Le travail exposé dans ce manuscrit s'inscrira donc dans cette logique de compréhension du mouvement permettant par la suite la simulation d'un mouvement réaliste. Nous nous intéresserons en particulier à des tâches manuelles ayant des séquences de mouvement multiples. Pour ce faire, nous nous appuyerons sur des données de manipulation d'objet récoltées au cours d'une thèse précédente réalisée au sein du laboratoire (Savescu, 2006).

1.2. Problématique scientifique

Comme précisé précédemment, l'une des difficultés majeures pour la simulation de mouvement est l'indétermination d'une solution unique due au choix multiple de trajectoires de l'effecteur concerné (par exemple la main) et à la redondance cinématique du corps. Dans le cas d'une tâche de manipulation d'objet, nous pouvons envisager une liste non exhaustive de questions associées à la problématique de la simulation de cette tâche :

- _ L'objet peut-il être atteint ?
- _ Comment l'objet est-il atteint ?
- _ La trajectoire d'atteinte doit-elle éviter un obstacle ?
- _ Comment l'objet est-il saisi (voire re-saisi au cours de mouvement) en fonction de tâche à effectuer ?
- _ Comment la trajectoire de la main est-elle planifiée en présence d'obstacle ou sans obstacle ?
- _ Comment s'effectue la transition de la posture initiale à celle de saisie, et de la saisie à la fin de la manipulation ?
- _ Quels sont les facteurs déterminant de la tâche ayant un effet sur la réalisation de l'ensemble du mouvement ?

De par la diversité des tâches manuelles et des différents outils existants, aucune de ces questions ne semble triviale et nous ne pouvons envisager de répondre à l'ensemble de ces questions dans ce manuscrit. Nous chercherons donc au cours de ce travail à apporter des réponses sur la résolution des problèmes de redondance cinématique, dans la tâche de manipulation afin d'obtenir un outil de simulation de cette même tâche. La démarche se basera sur une approche expérimentale et cherchera à caractériser les déterminants de la coordination du membre supérieur de l'opérateur en fonction des caractéristiques de la tâche demandée, dans un cas simple où l'objet à manipuler peut être atteint, et ce sans obstacle.

1.3. Plan

Dans ce but, nous chercherons dans le chapitre 2 à faire une revue de la littérature sur les méthodes de simulation de mouvement et leur applicabilité au mouvement de manipulation d'objet ainsi que sur les théories de contrôle moteur existante sur de tels mouvements. L'analyse de cet état de l'art nous permettra de préciser nos objectifs développés dans la suite du manuscrit. Le chapitre 3 se centrera sur une étude expérimentale d'une tâche simple de rotation de sphère selon un axe fixe, avec des amplitudes allant de 45° à 360° dans les deux sens. Le chapitre 4, cherchera à comprendre l'effet des limites articulaires sur le mouvement à l'aide de simulations. Les résultats de ce chapitre nous permettrons également d'approfondir l'analyse des résultats expérimentaux présentés dans le chapitre 3. Grâce à l'ensemble des observations et conclusions intermédiaires des chapitres 3 et 4, nous serons alors en mesure de proposer dans le chapitre 5 un algorithme de simulation de posture au moment de la saisie et ainsi proposer une simulation de la tâche de rotation dans son ensemble. Enfin, le chapitre 6, exposera les conclusions générales de ce manuscrit et présentera les perspectives à considérer à partir du travail effectué.

2 Etat de l'art

2.1. Introduction

La manipulation d'un objet peut se définir comme étant un mouvement multi-séquentiel effectué par le membre supérieur. Les différentes phases de la manipulation sont clairement définies comme étant l'atteinte, la saisie et la manipulation de l'objet à proprement parler. L'atteinte, également appelée transport (Woodworth, 1899 ; Jeannerod, 1981 ; Jeannerod, 1984), est la phase qui permet à un individu d'approcher sa main de l'objet à partir d'une posture initiale. Une fois la main amenée dans l'environnement proche de l'objet, la saisie peut être effectuée. Cette dernière consiste à attraper l'objet en fonction de la tâche à accomplir avec ce dernier. Enfin, la manipulation de l'objet en elle-même consistera en une modification de sa position et/ou de son orientation. De telles actions sont effectuées à maintes reprises dans une journée, laissant croire qu'elles n'impliquent aucune difficulté. Or il n'en est rien. Nombreux sont les paramètres influençant ce geste et qui doivent être pris en compte par l'individu. Le système nerveux central (SNC) permet de telles interactions entre l'Homme et son environnement. En effet, ce dernier traite en continu les informations perçues sur l'environnement afin d'ajuster le mouvement produit à toute perturbation pouvant survenir.

Dès lors, si l'on souhaite être en mesure de simuler un mouvement, il est nécessaire de comprendre le fonctionnement du SNC afin de pouvoir reproduire son action. Dans le cas de la manipulation d'objets, différents problèmes se posent en particulier :

- _ Comment simuler les 3 phases qui le composent ?
- _ Comment simuler la transition entre chaque phase ?
- _ Quels sont les problèmes spécifiques à chaque phase ?
- _ Quels sont les facteurs influençant le mouvement ?
- _ Comment le mouvement est-il contrôlé ?

La simulation d'une tâche manuelle doit faire face essentiellement (mais pas uniquement) à deux problèmes indéterminés liés à la redondance cinématique : la planification de la trajectoire de la main (organe terminal) et le suivi de cette trajectoire. Tout d'abord, l'outil de simulation doit être en mesure de déterminer une posture de saisie et une trajectoire du

mouvement en fonction de la tâche à réaliser parmi une multitude de possibilités. Il s'agit du problème de planification de la trajectoire. Dans un second temps, une posture caractérisée par les angles articulaires doit être choisie parmi une multitude de possibilités à chaque position de la main. Il s'agit alors de résoudre le problème de la cinématique inverse.

Ne pouvant tout étudier en détail dans ce travail de thèse, nous nous intéressons au mouvement du membre supérieur, cela sans considérer les mouvements des doigts et du tronc. De plus, nous focaliserons le travail de simulation sur la détermination de la posture de saisie en fonction de la tâche. En effet, cette dernière est un point-clé dans le mouvement de manipulation. Afin de répondre à nos problématiques, le présent chapitre a pour objectif de réaliser un état de l'art sur les connaissances actuelles en contrôle du mouvement, en particulier pour les tâches manuelles. De plus, nous y développerons également les différents principes de simulation de mouvement pouvant s'appliquer le mieux à notre situation.

2.2. Le membre supérieur : un système redondant

2.2.1. Rappels sur le membre supérieur

Le membre supérieur est un système poly-articulé. Cette affirmation traduit la complexité structurelle de ce dernier, composé du bras, de l'avant-bras et de la main. Ces différents segments sont mobiles les uns par rapports aux autres grâce aux articulations qui les séparent, à savoir le coude (entre le bras et les deux os de l'avant-bras) et le poignet (entre l'avant-bras et la main). A ces articulations inter-segmentaires, s'ajoutent des articulations intra-segmentaires, à savoir les deux articulations radio-ulnaire (au sein de l'avant-bras) et les différentes articulations au sein de la paume de main et des doigts. Enfin, s'ajoute à ces articulations, celle de l'épaule, articulation complexe divisible en 3 articulations principales : la sterno-claviculaire, l'acromio-claviculaire et la scapulo-humérale. Afin de simplifier l'articulation de l'épaule, seule les trois rotations autour de l'articulation scapulo-humérale sont considérées. L'ensemble de ces articulations, de l'épaule aux bouts de doigts offre un grand nombre de degrés de liberté (ddls) : 3 pour l'articulation gléno-humérale de l'épaule, 2 pour l'avant-bras, 2 au niveau du poignet soit un total de 7 degrés de liberté pour positionner et orienter la main dans l'espace. Bien que le membre supérieur ne s'arrête pas à la paume de main, nous limiterons cependant ce travail de thèse à ces 7 ddls, en ne considérant pas par la suite les ddls inhérents à la paume de la main et aux doigts. En effet, ces derniers relèvent de

travaux à part entière étant donnée la complexité du système concerné. De plus, pour simplifier la représentation de l'attitude de l'épaule, il est possible de parler « d'angle combiné de rotation » (*combined arm rotation angle* par (van der Vaart, 1995). Cet angle, également appelé angle de pivot (Korein, 1985 ; Tolani and Badler, 1996 ; Wang, 1999a) a pour axe de rotation l'axe formé par l'épaule et le poignet. Il n'a cependant de sens que lorsque l'angle de flexion du coude est quasi constant.

2.2.2. Une redondance multi-échelle

Si l'on considère un total de 6 contraintes pour placer et orienter la main, le membre supérieur présente une redondance de ses ddls (7 de l'épaule à la main). Cela implique une infinité de solutions pour répondre à 6 contraintes. Cette redondance du membre supérieur se retrouve à toutes les échelles. En effet, l'obtention d'une posture donnée (c'est-à-dire un ensemble d'angles articulaires répondant à la contrainte), est le résultat d'une activation du système musculaire. Or, pour une articulation donnée, plusieurs muscles entrent en jeu. Ainsi, différentes actions musculaires peuvent être produites afin d'atteindre une posture identique. Apparaît alors une redondance dynamique du système. Et ainsi de suite, nous pouvons descendre du macroscopique jusqu'au microscopique, tout en constatant à chaque instant une redondance dans le système de production de mouvement (Latash, 2012). Ne pouvant nous intéresser à l'ensemble des échelles évoquées ici, nous traiterons dans ce manuscrit de la gestion de la redondance cinématique uniquement.

2.3. Contrôle moteur et gestion de la redondance

2.3.1. Redondance versus abondance

Nous avons évoqué dans le paragraphe précédent la redondance du membre supérieur à différentes échelles, du macroscopique au microscopique. Cependant, il semble que le système nerveux central réussisse à gérer cette redondance afin de produire des mouvements peu variables au niveau de l'effecteur pour une situation donnée, bien que la variabilité des différents ddls impliqués soit plus grande. Cette observation nous vient de Nikolaï Bernstein qui s'intéressa à l'époque à une tâche effectuée par des travailleurs consistant à frapper un burin avec un marteau. Il s'interrogea alors sur la façon dont le système nerveux central

(SNC) pouvait résoudre le problème de redondance afin de produire un mouvement peu variable. De son point de vue, le SNC résoudrait la redondance en supprimant les ddls non nécessaires. Il découle de cette idée l'ensemble des travaux cherchant à optimiser un ou plusieurs facteurs afin d'ajouter des contraintes à la tâche et ainsi être en mesure de déterminer une cinématique possible. Les critères d'optimisation pouvant être utilisés, sans être exhaustif, sont la minimisation du jerk (Flash and Hogan, 1985), la minimisation des changements de couples articulaires (Uno et al., 1989), la minimisation des vitesses angulaires (Wang and Verriest, 1998), la minimisation du travail mécanique (Soechting et al., 1995), la minimisation de l'inconfort au travers de fonctions de coût (Cruse and Brüwer, 1987 ; Cruse et al., 1990 ; Jung and Choe, 1996 ; Pannetier, 2012) ou encore d'autres critères issus de la robotique tels que la maximisation de la dextérité (Lepoutre, 1993 ; Jung et al., 1995). Un état de l'art plus précis sur la résolution de la redondance des systèmes biologiques redondants a été effectué auparavant par Gielen et col. (1995). Il ressort de leur travail que bien que des solutions d'optimisation semble pouvoir résoudre la redondance d'un système biologique, chaque solution reste néanmoins valable uniquement pour la situation étudiée dans chacun des travaux présentés (Gielen et al., 1995). Dès lors, il serait intéressant de pouvoir trouver une solution plus globale à la résolution de la redondance pour la simulation de mouvement.

D'autre part, un nouveau point de vue est apparu, n'utilisant pas le terme de « redondance » mais plutôt celui « d'abondance ». Ce principe implique que la redondance des ddls ne soit pas vue comme un problème mais plutôt comme une capacité du système à répondre à plusieurs tâches à la fois ou encore à s'adapter à un environnement changeant (Latash, 2012). Dès lors, ce principe n'implique pas une solution donnée mais une famille de solutions pouvant répondre à la tâche de manière équivalente. Cela ouvre alors de nouvelles perspectives quant à la problématique de simulation de mouvement qui, dans la majeure partie des cas, tendait à chercher une solution unique à un problème donné.

2.3.2. Contrôle moteur et SNC

De manière simplifiée, Latash décrit le système de production de mouvement comme étant divisé en 2 éléments (Latash, 2012) :

- _ le contrôleur : ce dernier reçoit une information définie comme étant la tâche à réaliser
- _ l'effecteur : ce dernier reçoit une commande de la part du contrôleur afin de réaliser la tâche.

La tâche reçue par le contrôleur est la résultante d'une prise de décision à un niveau supérieur par une structure neurale (Latash, 2012). De manière générale, la tâche consiste à faire correspondre l'état de l'effecteur, à un instant donné, à un nouvel état désiré. Afin d'atteindre l'état souhaité, le contrôleur peut recevoir ou non des informations sur l'état de l'effecteur à un instant donné du mouvement. On parle alors de contrôle en boucle ouverte quand le contrôleur n'a pas de retour sur l'état de l'effecteur et de boucle fermée dans le cas contraire. Dans ce second cas, on parle également de « feedback », pour nommer l'information reçue par le contrôleur sur l'état de l'effecteur (Latash, 2012).

Dès lors, on constate que le système de contrôle cherche à diminuer un écart entre deux états de l'effecteur : l'état à un instant donné et l'état désiré. Différentes approches dans le domaine du contrôle moteur se sont penchées sur une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents. La première, appelée « hypothèse du point d'équilibre » (Feldman, 1966 ; Feldman, 1986) met en avant des variables physiologiques comme étant contrôlées par le système nerveux central. Cette hypothèse suppose que pour atteindre un nouvel état, ou une nouvelle position du corps, le système de contrôle définit la position désirée comme étant un nouvel état de référence. Dès lors, le système neuro-musculaire est stimulé afin de faire correspondre l'état actuel du système avec le nouvel état de référence. Cependant, cette théorie semble ne pas faire l'unanimité dans le domaine, comme le montre l'article cible de Latash en 2010 (Feldman, 2010 ; Latash, 2010a ; Latash, 2010b ; Loeb, 2010 ; Shadmehr, 2010). N'étant pas spécialistes du domaine, nous laisserons ici à qui de droit l'approfondissement de la discussion de chacun des points de vue. A un niveau plus haut de contrôle, s'est développée la théorie du tau (Lee, 2005). Cette théorie repose sur le constat précédemment mentionné, à savoir qu'un mouvement peut se définir comme une action de réduire l'écart entre un état connu et un état désiré. Cet écart, initialement défini en terme de distance peut en fait être généralisé à toute dimension de mesure : distance, angle, force (Lee, 2005).

2.3.3. Préhension et canaux visuo-moteurs

Quelle que soit la théorie, le système a besoin, à un moment ou un autre, de prendre une information sur la situation et sur la tâche à résoudre, y compris dans les tâches manuelles qui nous intéressent. Dans la majeure partie des cas, cette prise d'information se fait par la vision et permet de repérer toutes les caractéristiques de l'objet à saisir : forme, taille, position,

orientation, etc. Ces caractéristiques ont été classées par Jeannerod en deux types : les caractéristiques extrinsèques (position, orientation, vitesse par exemple) et les caractéristiques intrinsèques (taille, forme par exemple) (Jeannerod, 1981). Or, il semblerait que des mécanismes cérébraux différents soient impliqués dans la perception de ces deux caractéristiques (Trevarthen, 1968). Dès lors, de nombreux travaux, en particulier de Jeannerod, ont cherché à vérifier s'il existait bien des canaux distincts de perception-action (Jeannerod, 1981) : modèle connu sous le terme de canaux visuo-moteur parallèles (« parallel visuomotor channels »). Ce modèle implique que des actions complexes telles qu'un mouvement d'atteinte-saisie d'objet puisse être divisé en différentes unités, contrôlées en parallèle (Arbib, 1981 ; Jeannerod, 1981 ; Gentilucci et al., 1991 ; Paulignan and Jeannerod, 1996), à savoir le transport du bras, l'orientation de la main et la saisie (Arbib, 1981). De plus, il semblerait que les caractéristiques de l'objet (intrinsèques ou extrinsèques) aient un effet sur la préhension de l'objet. Plus précisément, les caractéristiques intrinsèques de l'objet auraient un effet sur la saisie tandis que les caractéristiques extrinsèques influenceraient la phase d'atteinte sans affecter la saisie (Jeannerod, 1981 ; Jeannerod, 1984). Cela peut présenter un intérêt certain pour la simulation si nous pouvons découper le mouvement d'atteinte-saisie en plusieurs éléments. Cependant des études plus récentes montrent que ces deux composantes du mouvement sont interdépendantes et que le couplage temporel entre elles n'est pas si rigide (Paulignan et al., 1997). De plus, il semblerait que la phase de transport ne soit pas uniquement influencée par les caractères extrinsèques de l'objet (Kudoh et al., 1997) et que plus globalement, la phase de transport et d'orientation de la main n'appartiennent pas à des canaux visuo-moteurs indépendants (Desmurget et al., 1996).

2.4. Effets de la tâche sur le geste de manipulation

Si de nombreuses études ont été effectuées sur le mouvement d'atteinte et de saisie (voir (McKenzie and Iberall, 1994 ; Desmurget et al., 1998) pour une revue détaillée), beaucoup moins de travaux existent sur la tâche de manipulation et son effet sur la coordination des ddl du membre supérieur.

2.4.1. Atteinte

Les principales caractéristiques spatiales et temporelles de l'atteinte peuvent se résumer comme suit (voir (McKenzie and Iberall, 1994 ; Desmurget et al., 1998) pour une revue plus complète) :

- _ La trajectoire de la main d'atteinte d'une cible est proche d'une ligne droite, avec une légère incurvation (Morasso, 1981 ; Cruse and Brüwer, 1987 ; Uno et al., 1989).
- _ Le temps d'atteinte d'une cible augmente avec la difficulté de la tâche, pour un mouvement aussi rapide et précis que possible. Cette observation est bien connue sous le nom de loi de Fitts (Fitts, 1954).
- _ Précision de la loi de Fitts : les mouvements d'atteinte présentent un profil de vitesse symétrique en cloche pour des mouvements non contraints sans nécessité de précision et un profil de vitesse asymétrique pour des mouvements avec une contrainte de précision. McKenzie et al. ont montré un allongement de la phase de décélération corrélé à une diminution de la taille de la cible à atteindre (McKenzie et al., 1987). Cela est dû au caractère balistique du mouvement d'atteinte dans un premier temps. En effet, le système nerveux central (SNC) adapte ensuite le mouvement par un système de feed-back (voir (Rosenbaum, 2010), chapitre 2). Cet allongement de la phase de décélération avec la difficulté de la tâche a également été confirmé plus récemment (Lim et al., 2004 ; Krüger et al., 2012). Dès lors, durant l'analyse expérimentale de notre tâche de manipulation, nous devons nous attendre à un changement de la cinématique du mouvement en fonction de sa difficulté relative.
- _ Ré-accélération durant la phase de décélération quand la main s'approche de la cible durant un pointage, en particulier quand la cible est petite (Soechting, 1984), ainsi que pour une saisie (Wang, 1999b).
- _ Le pic de vitesse dépend de la distance à la cible (McKenzie et al., 1987). Non seulement le temps d'atteinte augmente, mais également la vitesse pic. De plus, il semblerait que la distance augmente également le niveau d'activation musculaire au cours du mouvement (Bonnetoy et al., 2009 ; Louis and Gorce, 2009).
- _ Une segmentation fonctionnelle des ddls proximaux et distaux (Jeannerod, 1981 ; Soechting, 1984 ; Paulignan and Jeannerod, 1996). Les ddls proximaux serviraient à la phase de transport (Dean and Brüwer, 1995) tandis que les ddls distaux seraient plus impliqués dans la phase de saisie (Wang, 1999b). Dès lors, il sera nécessaire de considérer une éventuelle simulation prenant en compte l'éloignement à la cible,

comme effectué par Wang (Wang, 1999a), en utilisant une simulation basée sur des règles de comportement.

- _ La posture finale dépend de la posture initiale (Soechting et al., 1995), et donc de la direction de l'atteinte (Roby-Brami et al., 2003). Cependant, une fois encore, cela ne prend pas en compte l'éventualité d'une action suite à la saisie. Il serait alors intéressant de se focaliser sur l'effet d'une action postérieure.
- _ La position de l'objet va influencer la coordination temporelle des différents ddls du bras au cours de l'atteinte. Tous les ddls ne commencent pas à participer à la tâche et ne terminent pas en même temps (Lim et al., 2004). D'après ces auteurs, ces délais interarticulaires devraient donc être pris en compte pour toute simulation de mouvement d'atteinte, ce qui n'est pas fait jusqu'à présent.

2.4.2. Saisie

Une fois saisi, l'objet est la plupart du temps associé à une tâche manuelle, nécessitant parfois une production de force. Qu'en est-il alors de l'effet de la tâche en elle-même (une fois l'objet saisi) sur les phases de transport, de saisie ou de manipulation. Pour une tâche de rotation de commandes rotatives, van der Vaart a mis en avant une anticipation croissante avec l'amplitude de la tâche demandée (van der Vaart, 1995). Ainsi, pour des rotations de forte amplitude dans le sens horaire, il a été observé une élévation du coude et une pronation de plus en plus élevées avec la demande. Cette anticipation est cependant dépendante du sujet puisque van der Vaart a pu montrer l'existence de différentes stratégies. D'après ce dernier, le choix d'une stratégie ou d'une autre pourrait être dépendant des habiletés personnelles. Cependant, il faut noter que les amplitudes des rotations demandées dans l'étude étaient relativement faibles (de -120° à 120°), et ne mettaient donc pas en jeu les butées articulaires. Nous pouvons dès lors nous demander quel serait l'effet des butées articulaires sur une tâche similaire. Le phénomène d'anticipation a également été confirmé plus récemment par Herbort et Butz sur une tâche de rotation comparable (Herbort and Butz, 2010). Cependant, le bras étant quasiment tendu durant la rotation, il fut difficile pour les auteurs d'estimer la participation de chaque ddl du bras durant la tâche due à la singularité issue de l'alignement des deux segments du bras.

Que ce soit pour l'une ou l'autre de ces deux dernières études, les variables ont été étudiées aux instants de saisie, en tout début de rotation ainsi que sur la posture de fin de rotation. Cela

ne permet cependant pas d'estimer la méthode de transition d'un état à l'autre. En effet, les sujets peuvent tourner l'objet présenté en mobilisant les articulations de l'épaule et/ou du coude et du poignet. Ceci implique un nombre infini de possibilités de transitions de la posture de saisie à la fin de la rotation. Ainsi par exemple, si la situation le permet, la rotation peut se faire en utilisant uniquement l'un ou l'autre des mécanismes exposés ci-dessus (rotation par l'épaule ou rotation par l'avant-bras) ou par une combinaison des deux. Ce dernier cas est généralement adopté (van der Vaart, 1995 ; Herbolt and Butz, 2010 ; Lardy et al., 2010) mais rien ne nous indique si un mécanisme est prépondérant, et si oui lequel. Or, afin de simuler une cinématique complète pour une tâche similaire de rotation, ces connaissances sont nécessaires.

L'anticipation observée précédemment peut s'expliquer par la théorie de confort final définie par (Rosenbaum et al., 1990). En effet, celle-ci implique une dégradation du niveau de confort initial afin de conserver un meilleur niveau de confort en fin de mouvement. Cependant, la tâche étudiée par Rosenbaum était très simplifiée (une amplitude de rotation) et contrainte (saisie d'un cylindre). Nous pouvons dès lors nous interroger sur la validité de cette hypothèse dans le cas d'une saisie d'objet présentant moins de contraintes, comme une sphère par exemple. Cet indice de confort peut se relier à d'autres indices d'évaluation ergonomique. En effet, le risque de troubles musculo-squelettiques (TMS) est en lien avec des positions extrêmes, à la répétition d'un geste et à l'application de force requise par un mouvement. Ainsi, Louis et Gorce propose des plages de risques en fonction de l'éloignement d'une posture de son « neutre articulaire » sous la forme de fonctions en « U » (Louis and Gorce, 2009). De plus ce dernier avance que des mouvements de fortes amplitudes engendreraient un risque important de TMS. Il serait donc intéressant de regarder dans quelle mesure un individu adapte son geste dans le cas d'amplitude importantes.

Dans le cas où la tâche de manipulation requiert une application de force, nombreux sont les paramètres influençant les capacités d'effort : genre, âge, anthropométrie du sujet, caractéristiques de l'objet sur lequel est produit l'effort, encouragements au cours de la tâche, ... (voir Chapitre 12 de (Delleman et al., 2004) pour un état de l'art). Parmi l'ensemble des études effectuées sur le sujet, il ressort sans contradictions que la posture a un effet sur la capacité de production de force maximale (Johnson and An, 1994 ; Kattel et al., 1996 ; Roman-Liu and Tokarski, 2005 ; O'Sullivan and Gallwey, 2005). Cependant, peu d'études se sont intéressées à l'effet du niveau d'effort à appliquer sur la posture, en particulier dans les tâches de manipulation d'objet. Nous pouvons alors nous demander comment la posture de

saisie évolue en fonction du niveau d'effort requis de manière à être en mesure de considérer ce facteur dans un outil de simulation.

2.4.3. Manipulation d'objets

Les différentes études menées sur des tâches de manipulation ont eu tendance à mettre l'accent sur les postures de début et de fin de manipulation sur des tâches de rotation (van der Vaart, 1995 ; Robert et al., 2009), mais qu'en est-il de la phase de manipulation en elle-même ? En effet, si l'on désire simuler un mouvement, il sera nécessaire d'avoir des connaissances non seulement sur la posture de départ, mais également la façon dont se fait la transition de la posture de départ à l'état final. Fan et al. ont avancé qu'une participation des ddls du bras était dépendante de l'amplitude de rotation (Fan et al., 2006). Cependant, l'objet saisi étant un cylindre, ceci contraint l'orientation de la main. D'autre part, le bras étant proche de l'extension complète, la tâche étudiée s'éloigne d'une tâche naturelle.

Pour des tâches de déplacement dans le plan horizontal, on constate également un phénomène d'anticipation dépendant de la tâche. En effet la posture de saisie est influencée par la direction du déplacement, plus que par la posture de repos (Schot et al., 2010). Il est alors intéressant de noter ici que la tâche succédant à la saisie a toute son importance. Ces observations présentent néanmoins quelques limitations, la première étant le nombre restreint de sujets, incluant qui plus est les expérimentateurs, et la seconde étant les angles étudiés. En effet, ces derniers ne représentaient qu'indirectement les angles articulaires, par des projections dans le plan horizontal, rendant toute analyse biomécanique plus difficile. Il serait donc intéressant de chercher à confirmer ou réfuter ces conclusions, en trois dimensions d'une part, et avec plus de sujets d'autre part. De plus, cette dernière étude ne s'est toujours pas focalisée sur la coordination des ddls au cours du déplacement de l'objet. Nous pouvons dès lors nous demander comment évoluent les cinématiques de chaque ddl en fonction de la tâche. Cette question a été étudiée entre autres par Alazmani et al.(2009). Ces derniers ont observé un couplage entre les différents ddls du bras au cours d'une tâche cyclique de pointage de cibles

(Alazmani et al., 2009), plus particulièrement entre les ddls des axes longitudinaux du bras et de l'avant-bras. Cependant, la tâche étudiée était très contrainte et nous pouvons nous demander si un tel couplage peut également être observé sur une tâche plus proche d'une tâche quotidienne, et comment évolue ce couplage en fonction des caractéristiques de la tâche.

2.5. Méthodes de simulation de mouvement

Il est nécessaire de noter la différence exposée par Badler entre animation et simulation de mouvement (Badler et al., 1993). En effet, si la qualité d'une animation dépend fortement du niveau d'expertise de l'animateur, le réalisme d'une simulation dépend seulement du modèle et de la méthode utilisés (Badler et al., 1993). Plus concrètement, l'animation consiste à décrire un mouvement, le plus souvent imaginé par l'animateur. Le résultat est un mouvement unique, tel que le désire l'animateur. La simulation de mouvement quant à elle peut être définie comme une automatisation du processus d'animation. Le mouvement simulé est obtenu par calculs en fonction des entrées fournies par l'utilisateur à l'ordinateur. L'utilisateur dans ce cas, peut ne pas avoir d'idée du mouvement qui en résultera. Malgré ces différences, les méthodes appliquées en animation ou en simulation sont très proches. C'est pourquoi nous nous traiterons ici des méthodes utilisées dans les deux cas, sans les trier selon leur application. Différentes classifications sont envisageables. Ainsi, Multon a divisées ces méthodes en 3 catégories : basées sur la cinématique, basées sur la dynamique et les méthodes d'édition de mouvement (Multon et al., 1999). Gleicher a quant à lui séparé les méthodes de synthèse de mouvement des méthodes d'édition de mouvement (Gleicher, 2001). En ce qui nous concerne, nous classifierons ces méthodes selon 3 axes, dont 2 développés par Monnier : les méthodes de manipulation posturales, basées sur des connaissances, les méthodes d'édition de mouvement, basées sur des données (Monnier, 2004) et enfin les méthodes hybrides.

2.5.1. Méthodes basées sur des connaissances

L'outil de la cinématique inverse est particulièrement utile aux utilisateurs de mannequins numériques (DHM) dans la définition de postures contraintes et réalistes. Dans ce but, des connaissances sur le mouvement sont introduites dans les méthodologies de cinématique inverse nécessaires pour contrôler un objet poly-articulé tel que des mannequins numériques. Cette méthode offre l'avantage de pouvoir être appliquée à un nombre important de situations. Cependant, elle ne peut servir aisément à la simulation de mouvements complexes. Les connaissances utilisées peuvent déterminer quel critère doit être optimisé que ce soit les

couples articulaires ou la proximité des limites articulaires par exemple. Nous détaillerons par la suite les critères d'optimisation utilisés en de l'outil de cinématique inverse utilisé.

2.5.1.1. Cinématique inverse

La cinématique inverse s'oppose à la cinématique directe. Pour rappel, la cinématique directe d'un système permet d'obtenir la position et l'orientation d'un effecteur ou des effecteurs de ce système en connaissant les valeurs des degrés de liberté de ce dernier (voir Équation 2-1).

$$\mathbf{X} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}) \quad \text{Équation 2-1}$$

Résoudre le problème de la cinématique inverse revient à trouver des valeurs pour chaque degré de liberté du système de manière à répondre aux contraintes \mathbf{X} imposées par une situation (voir Équation 2-2).

$$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{X}) \quad \text{Équation 2-2}$$

Afin de résoudre l'Équation 2-2, le problème est le plus souvent formulé en utilisant une méthode de pseudo-inverse : sur une chaîne poly-articulée, les degrés de liberté (ou angles articulaires) peuvent être reliés à la position de l'effecteur par une relation non-linéaire en l'espace articulaire ($\boldsymbol{\theta}$) et l'espace de la tâche (contraintes de l'effecteur dans l'espace cartésien). Si l'on dérive la relation de l'Équation 2-1, on obtient :

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad \text{Équation 2-3}$$

avec $\dot{\mathbf{X}}$ étant le déplacement de l'effecteur et $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ le changement au niveau des degrés de liberté. \mathbf{J} est appelé la matrice jacobienne de taille $m \times n$, n correspondant au nombre de degrés de liberté du système et m étant le nombre de contraintes sur l'effecteur. Il faut cependant bien rappeler ici que cette matrice ne fonctionne qu'en variations et ne peut donc être utilisée pour déterminer un état absolu. La jacobienne d'un système reliant m contraintes et n degrés de liberté regroupe l'ensemble des dérivées partielles de la façon suivante :

$$J_{m,n} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f x_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f x_1}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial f x_1}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial f x_2}{\partial \theta_1} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f x_m}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f x_m}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial f x_m}{\partial \theta_n} \end{pmatrix} \quad \text{Équation 2-4}$$

L'Équation 2-3 met en relation des modifications au niveau des ddls avec les modifications résultantes au niveau de l'effecteur. L'objectif de la cinématique inverse est de pouvoir estimer la valeur de chaque ddl en fonction des déplacements de l'effecteur. Cela peut s'effectuer en inversant la jacobienne. Le problème est que l'inverse de la jacobienne n'est pas unique étant donnée la redondance de la plupart des systèmes de formes articulées. Afin de choisir une solution donnée, le critère le plus utilisé est de choisir la solution minimisant les changements d'angles articulaires. Cela est possible en utilisant la pseudo-inverse de la jacobienne J^+ , avec $J^+ = J^T(JJ^T)^{-1}$. Étant donné que la jacobienne est une linéarisation d'une fonction non-linéaire, cette solution peut entraîner des erreurs, en particulier dans le cas de variations de l'effecteur (\dot{X}) importantes.

Cependant, il peut être nécessaire d'avoir à spécifier plus de contraintes que la position et l'orientation de l'effecteur. Ainsi, dans le domaine de la robotique (tout comme pour les mannequins numériques), Liégeois a cherché à trouver une solution permettant de rester dans des limites articulaires (Liégeois, 1977). Sa solution proposée est la suivante :

$$\dot{\theta} = J^+ \dot{X} + (I - J^+ J) Z \quad \text{Équation 2-5}$$

avec Z un vecteur arbitraire d'angles articulaires et $(I - J^+ J)$ étant la projection de Z dans l'espace nul. Cette projection permet de ne pas changer la position de l'effecteur tout en autorisant une tâche secondaire telle que l'évitement des butées articulaires par exemple, ou encore l'évitement de collisions entre la forme articulée et son environnement (Maciejewski and Klein, 1985).

On voit ici que l'utilisation de la cinématique inverse permet la détermination des ddls en fonction des contraintes de l'effecteur mais qu'elle permet également l'addition de contraintes multiples sur le contrôle de la posture de la forme articulée considérée.

L'utilisation de la jacobienne n'est cependant pas l'unique solution pour résoudre le problème de cinématique inverse. Les autres solutions existantes peuvent être géométriques

(Wang and Verriest, 1998), analytiques (Tolani and Badler, 1996 ; Tolani et al., 2000) ou encore basées sur de la programmation non linéaire (Zhao and Badler, 1994).

2.5.1.2. Programmation non-linéaire

Basé sur un outil de cinématique inverse non linéaire, Badler et ses collaborateurs ont ajouté des contraintes supplémentaires dans l'espace permis par les limites articulaires (Badler et al., 1993). Par exemple, des contraintes d'équilibre peuvent être ajoutées afin de conserver le centre de masse d'une forme dans son polygone de sustentation (en particulier pour un humain numérique). De plus, Zhao et Badler ont amélioré le réalisme des postures simulées en associant un facteur à chacun des ddl utilisé, définissant ainsi leur contribution relative à un changement de posture, évitant ainsi la simulation d'une posture irréaliste.

2.5.1.3. Pseudo-inverse

De par l'utilisation de la pseudo-inverse dans la cinématique inverse, Lepoutre a quant à lui pu définir plusieurs critères afin de prédire des postures du haut du corps en deux dimensions pour une personne travaillant sur un ordinateur (Lepoutre, 1993). Les contraintes sur l'effecteur étaient d'avoir les mains sur le clavier et les yeux orientés vers l'écran. Différents critères furent utilisés en seconde tâche (cf Équation 2-5), testés et comparés. Il ressortit que le critère de dextérité permette une bonne prédiction de posture. Ce critère, issu de la robotique, fait référence à la capacité de produire un mouvement en fonction de l'éloignement des butées articulaires. En d'autres mots, maximiser la dextérité revient à simuler une posture la plus éloignée des butées articulaires. Cependant, bien que ce critère semble simuler des postures ressemblant à des postures naturelles, les simulations effectuées par Lepoutre ne furent pas confrontées à des données expérimentales. Ce manque de comparaison a été corrigé par la suite par Jung et al. qui ont appliqué la même méthode et le même critère. Ces derniers ont enfin comparé les résultats obtenus à des données expérimentales et n'ont constaté aucune différence statistiquement significative entre postures simulées et réelles (Jung et al., 1995). Ce critère a été également utilisé plus récemment sous le terme de « manipulabilité » par Jacquier-Bret (Jacquier-Bret et al., 2012). Quel que soit le terme utilisé, ce critère renvoie à un indicateur de capacité de mouvement et peut dès lors s'utiliser en tant que critère ergonomique pour évaluer la posture simulée. Dans cette idée

d'ergonomie, on trouve également de nombreux travaux utilisant le critère d'inconfort. Ainsi Jung et al. ont utilisé ce dernier dans la simulation d'une tâche de pointage (Jung and Choe, 1996).

Une des limitations de l'utilisation de la pseudo-inverse est qu'elle est sensible à la posture initiale et nécessite la connaissance d'une trajectoire afin de simuler des postures successives, définissant alors un mouvement. De plus, l'utilisation de la pseudo-inverse est également sensible à l'écart entre deux instants simulés. Si l'écart de position de l'effecteur est trop, il peut alors en résulter un changement de posture important.

Wang et Verriest ont proposé de minimiser, pour un indice de déplacement donné, le déplacement du coude (Wang and Verriest, 1998). Cela revient à dire que l'angle de pivot est minimisé. Implémenté dans un algorithme géométrique dans le travail décrit, cette même solution peut également être adaptée à un outil utilisant la pseudo-inverse. En effet, il est possible d'introduire dans J^+ une matrice pondératrice W favorisant certains degrés de liberté plutôt que d'autres. D'après Zhang et al. (Zhang et al., 1998 ; Zhang and Chaffin, 2000), la détermination des pondérations peut se faire en se basant sur l'analyse de comportements réels. Dans cette logique, Mombaur et al. ont mis en place une méthodologie permettant de déterminer des paramètres de pondérations pour plusieurs paramètres d'optimisation dans le cas de la marche (Mombaur et al., 2010), permettant à des robots de générer des trajectoires de locomotion naturelle de manière autonome.

2.5.1.4. Discussion

Des difficultés sont cependant à noter dans l'approche basée sur des connaissances. La première consiste en l'identification des fonctions de coût. De plus, la validation de ces fonctions est souvent réalisée en utilisant des mouvements impliquant peu de segments du corps. D'autre part, les méthodes d'optimisation peuvent présenter des instabilités de calculs et nécessitent souvent un temps de calcul important.

Enfin, il faut noter qu'une solution unique est obtenue à l'issue du processus d'optimisation. Cependant, force est de constater que le mouvement humain présente de la variabilité. En effet, le principe d'abondance (issu du domaine du contrôle moteur) stipule que le système nerveux ne supprime pas de degrés de liberté pour réaliser un mouvement (comme

évoqué dans le principe d'optimisation) mais coordonne les degrés de liberté pour obtenir un ensemble de solutions. Il serait dès lors intéressant d'être en mesure de simuler la variabilité du mouvement humain.

2.5.2. Méthodes basées sur des données

A l'inverse du premier type de méthodes décrit, les simulations basées sur des données ne nécessitent que peu de connaissances sur le contrôle du mouvement. En effet, les méthodes basées sur des données utilisent des mouvements déjà existants. C'est d'ailleurs leur principale limitation, puisque de telles méthodes ne peuvent prédire qu'un type de mouvement déjà présent dans la base de données constituée. Il faut donc en théorie générer une nouvelle base de données de mouvement à la moindre modification de la tâche à accomplir. D'autre part, le réalisme de la simulation sera grandement dépendant de la richesse de la base de données. Les différentes méthodes basées sur des données seront classées par la suite de la manière suivante : celles utilisant la fusion de mouvement, la régression fonctionnelle et enfin celles modifiant des mouvements existants.

2.5.2.1. Fusion de mouvements

Multon définit la fusion de mouvement comme consistant en une interpolation entre les paramètres de mouvements existants dans une base de données afin d'obtenir un nouveau mouvement (Multon et al., 1999). Ainsi nous pouvons citer l'exemple de la simulation de marche avec plus ou moins de fatigue en partant d'un cycle de marche normal et un cycle de marche après fatigue (Unuma et al., 1995).

2.5.2.2. Régression fonctionnelle

De la même façon que pour la fusion de mouvements, le principe de régression fonctionnelle repose sur l'utilisation de mouvements existants. Dans ce cas, la quantité de données nécessaire est plus importante afin de pouvoir obtenir un modèle statistique couvrant toutes les variables pouvant influencer le mouvement : pour exemple les données du projet HUMOSIM pour la prédiction de mouvements d'atteinte dans lequel un ensemble de 8000 mouvements ont été réalisés par 20 groupes de sujets (Faraway, 1997 ; Faraway, 2000).

L'avantage de ce projet est qu'il résume statistiquement un grand nombre de données de mouvements d'atteinte capturés sur des sujets réels.

2.5.2.3. Modification de mouvements existants

Se basant également sur des bases de données, les méthodes classées dans cette catégorie reposent sur l'utilisation d'un seul mouvement de référence choisi dans la base de données, puis est modifié par la suite. Ainsi, dans le cadre du projet HUMOSIM, Park utilise une méthode de simulation basée sur la mémoire (Park et al., 2004). Après le choix d'un mouvement de référence, celui-ci est segmenté automatiquement puis modifié en minimisant la variation de la vitesse articulaire. De la même façon, Monnier propose un outil de simulation de mouvement basée sur des données pour la conception ergonomique de véhicules (Monnier et al., 2006). Dans ce cas, des scénarios sont définis par des instants clés dans lesquels des contraintes cinématiques sont spécifiées. Cela permet d'adapter le scénario sélectionné à une nouvelle situation comme une nouvelle tâche, ou une nouvelle anthropométrie. Cette méthode se prête bien aux mouvements complexes pouvant mettre en œuvre plusieurs stratégies de la part de l'opérateur et/ou pouvant présenter des collisions potentielles avec l'environnement. Cependant, à la restriction des capacités de simulation à des mouvements proche de ceux contenus dans la base, s'ajoute une seconde difficulté : le choix du mouvement servant de référence. Celui-ci peut être laissé au choix de l'utilisateur de l'outil de simulation ou guidé par une interface. Dans le premier cas, il est donc nécessaire malgré tout que l'utilisateur ait des connaissances sur le mouvement à simuler. Enfin, la préparation et l'analyse des bases de données restent des opérations délicates, les étapes principales étant la définition des stratégies, puis la définition des instants clés, et enfin des contraintes liées à ces instants clés.

A partir du principe de mémorisation utilisé par Park, des travaux se sont appliqués à la simulation de mouvement dans le cadre d'évitement d'obstacles (Park et al., 2006 ; Rezzoug and Gorce, 2009). Ce type de méthode permet d'éviter l'utilisation d'une base de données en tant que telle car celle-ci est alimentée par le système lui-même au cours de ses différentes itérations. De plus, l'étude de Rezzoug et Gorce présente l'avantage de proposer non pas une solution unique mais plusieurs. Le modèle permet ainsi prendre en compte la variabilité du mouvement humain. Cependant, ce dernier est pour le moment restreint à la simulation de

postures uniquement, il serait dès lors intéressant d'aboutir à la simulation du mouvement d'atteinte-saisie dans son ensemble et de considérer dans un second temps une tâche de manipulation de l'objet saisi (Rezzoug and Gorce, 2009).

2.5.3. Méthodes hybrides

Nous avons pu voir précédemment que différents types de méthodes de simulation existent. Toutefois, la frontière entre l'approche basée sur des données et l'approche basée sur des connaissances n'est pas forcément imperméable. L'introduction de connaissances dans une approche basée sur des données peut permettre d'étendre, en quelque sorte, le domaine de la base de données initiale. Il est donc important de comprendre comment les mouvements sont formés et quels types de connaissances peuvent être exploités pour rendre la méthode basée sur des données plus flexible et moins dépendante de conditions expérimentales.

Les apports mutuels de ces deux méthodes permettent d'élargir l'utilisation des données tout en ayant pour base un ou des mouvements enregistrés tendant à rendre la simulation plus réaliste. Citons par exemple la méthode utilisée dans HUMOSIM qui propose une approche de simulation de mouvements complexes divisés en différentes modules (Reed et al., 2006), en fonction de groupes segmentaires du corps. Cependant, le point critique d'une telle approche reste la coordination entre les différents modules afin de simuler une action complexe. Des concepts analogues sont également présents dans d'autres domaines, tel que dans l'animation par ordinateur. Ainsi, Multon a proposé une architecture et une méthodologie pour la coordination de « briques de mouvement » (Multon, 1998). Une telle approche peut être facilitée grâce à une collaboration étroite entre communautés scientifiques s'intéressant au mouvement (neurophysiologie, biomécanique, robotique, informatique, mathématique, ...). Cela pourra alors permettre d'aboutir à un outil de simulation plus facile à prendre en main pour la simulation de mouvements complexes.

2.6. Synthèse

La simulation d'une tâche manuelle dans son ensemble (de l'atteinte à la manipulation) est un problème complexe de par le grand nombre de degrés de liberté impliqués et la succession des séquences à simuler. Cette complexité est souvent évitée dans la bibliographie en ne s'intéressant qu'à une partie du mouvement par exemple. Nous pouvons citer entre autres les travaux récents d'Endo qui propose une méthode permettant de générer une posture de saisie de la main sans considérer le reste du corps (Endo, 2009). Lorsque le membre supérieur est considéré en entier (de l'épaule à la main), nous avons pu constater dans cet état de l'art que peu d'études s'intéressaient au mouvement de manipulation suivant la saisie. Cela peut s'expliquer par la grande variété de tâches manuelles existantes. C'est une des raisons qui font qu'un principe de simulation utilisant une base de données est peu envisageable dans ce cas. Il est alors nécessaire de trouver une solution pour être en mesure de simuler les tâches de manipulation. Nous chercherons donc à considérer les différents éléments pouvant influencer la tâche de manipulation afin de nous orienter vers un outil de simulation basé sur des lois de contrôle les plus génériques possibles. D'autre part, peu d'études se sont penchées sur la représentation de la variabilité humaine bien que cela semble être une caractéristique importante de l'Homme, et donc à considérer pour se rapprocher d'un comportement représentatif.

Il apparaît également dans la littérature que de nombreux paramètres influencent le geste d'atteinte-saisie (posture initiale, position de l'objet, caractéristiques intrinsèques et extrinsèques de l'objet, ...). En ce qui concerne la tâche de manipulation en elle-même, l'amplitude au cours d'une tâche de rotation semble avoir un effet sur la posture de saisie. Cependant, les différentes études menées sur le sujet ne se sont pas intéressées à l'effet de la tâche sur l'utilisation des différents ddl du bras entre la saisie et la fin de manipulation. D'autre part, nous avons pu constater que les amplitudes de rotation étudiées dans ces différents travaux étaient relativement faibles et ne mettaient donc que très peu en jeu les butées articulaires.

Dès lors, nous essayerons dans ce manuscrit de comprendre dans un premier temps l'effet de la tâche de manipulation sur le mouvement en considérant un objet ne présentant que peu de contrainte à la saisie, dans notre cas, une sphère. A partir de ce simple objet, nous chercherons à étudier les effets des butées articulaires sur les capacités de mouvement de rotation du bras (de l'épaule à la paume de main) en nous intéressant à des amplitudes de

mouvement importantes. Enfin, à partir de nos observations expérimentales, nous proposerons un algorithme de simulation prenant en compte le couplage des limites articulaires ainsi qu'un paramètre de variabilité. La saisie étant un point clé du mouvement multi-séquentiel de manipulation, nous nous focaliserons donc sur la détermination de cette posture dans la partie traitant de la simulation

3 Investigation expérimentale des effets de l'amplitude de rotation sur le mouvement du bras

3.1. Introduction

Comme évoqué plus tôt dans l'état de l'art, il existe beaucoup d'études sur le mouvement d'atteinte et de saisie mais très peu sur la manipulation d'objets. Lors d'une tâche de manipulation d'un objet tel qu'un bouton rotatif, le mouvement complet peut être décomposé en deux phases : saisie et manipulation. La simulation d'un tel mouvement pose plusieurs problèmes indéterminés :

- _ Quelle est la posture de saisie de l'objet ? Comment la tâche de manipulation affecte la posture de saisie ?
- _ Le mouvement de la phase de saisie est-t-il dépendent de la tâche de manipulation ?
- _ Pendant la phase de manipulation, comment sont coordonnés les différents degrés de liberté impliqués dans le mouvement ?

Pour répondre à ces interrogations, une tâche de rotation de sphère selon différentes amplitudes sera étudiée expérimentalement dans cette thèse. A la différence des travaux de Van der Vaart ou Herbort et Butz qui ont étudié les mouvements de rotation d'une sphère avec une faible amplitude, inférieure à 120° (van der Vaart, 1995 ; Herbort and Butz, 2010), une plage d'amplitude de rotation de 0° à 360° sera étudiée ici, permettant ainsi de prendre en compte les effets des limites articulaires. Le choix d'une sphère est motivé par le fait qu'elle ne présente aucune direction privilégiée pour la saisie.

Nous chercherons donc dans ce chapitre à observer et à comprendre les effets de la tâche de rotation (sens et amplitude) sur les phases d'atteinte et de manipulation. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux caractéristiques spatio-temporelles de ces deux phases, aux postures de début et de fin de manipulation ainsi qu'à la transition entre le début et la fin de rotation.

3.2. Matériel et méthode

3.2.1. Protocole expérimental

12 sujets droitiers (6 hommes et 6 femmes, âge moyen = $27,8 \pm 5,3$ ans, et taille moyenne = $170,1 \pm 9,4$ cm) ont pris part à l'expérimentation. Au préalable, chacun des sujets a pu poser toutes les questions qu'il/elle avait et a signé un consentement de participation à l'expérimentation.

Il était demandé aux participants d'atteindre et saisir une sphère (60 mm de diamètre) avec la main droite, depuis une posture de repos (voir Figure 3-1). Une fois la sphère saisie avec les 5 doigts (saisie en force¹), le sujet devait tourner la sphère sans relâcher et sans modifier la saisie durant la rotation, jusqu'à une amplitude donnée. Lorsque la cible était atteinte, le sujet devait relâcher la prise et revenir à la posture de repos. Une ceinture (type ceinture de sécurité) était utilisée afin de limiter les mouvements du torse au cours de la rotation. La sphère était placée à la hauteur de l'épaule droite du sujet, à une distance d'environ 0,6 fois la longueur du bras tendu ($46,3 \pm 2,8$ cm en moyenne). L'axe de rotation de la sphère était perpendiculaire au plan frontal du sujet.

Les amplitudes de rotation allaient de 360° dans le sens antihoraire (sens négatif) à 360° dans le sens horaire (sens positif), par incréments de 45° . Durant la rotation, les sujets pouvaient ressentir chaque incrément de 45° par une légère résistance. De plus, une tige, perpendiculaire à l'axe de rotation leur permettait de visualiser l'amplitude de rotation à chaque instant. Chaque amplitude était réalisée une fois, à l'exception des amplitudes $\pm 90^\circ$, effectuées 3 fois chacune. Au total, chaque sujet a effectué 20 mouvements de rotation, dans un ordre aléatoire. D'autre part, il a également été demandé à certains sujets d'effectuer des mouvements d'atteinte/saisie sans mouvement de rotation à produire par la suite. Ces données nous seront utiles dans un second temps, dans le 4.

¹ Saisie de force : saisie impliquant un contact des doigts et de la paume de la main sur l'objet =(Napier, 1956)=(Napier, 1956).

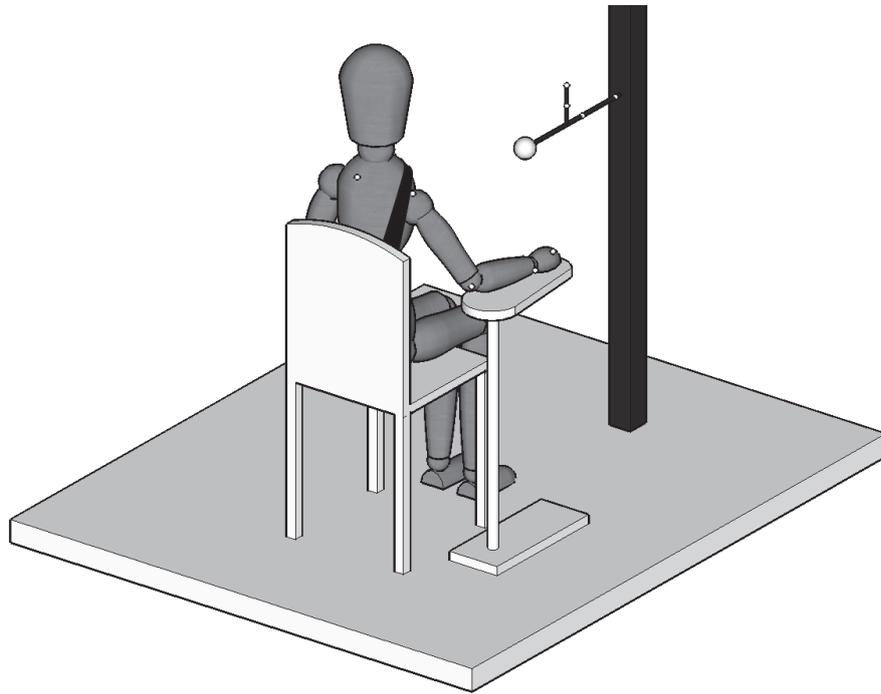


Figure 3-1. Situation de repos des expérimentations de rotation de sphère.

3.2.2. Systèmes de capture et de reconstruction du mouvement

3.2.2.1. Système de capture de mouvement

Afin d'enregistrer les mouvements effectués par les sujets, un système de capture optoélectronique (Vicon™ 524, Oxford, Royaume-Uni) a été utilisé. Il se composait de 11 caméras mesurant à 50 Hz les trajectoires d'un set de 28 marqueurs réfléchissants placés sur le torse, le membre supérieur droit (de l'épaule jusqu'aux doigts) ainsi que sur le support de la sphère (voir Figure 3-2 pour le placement des marqueurs sur le sujet).

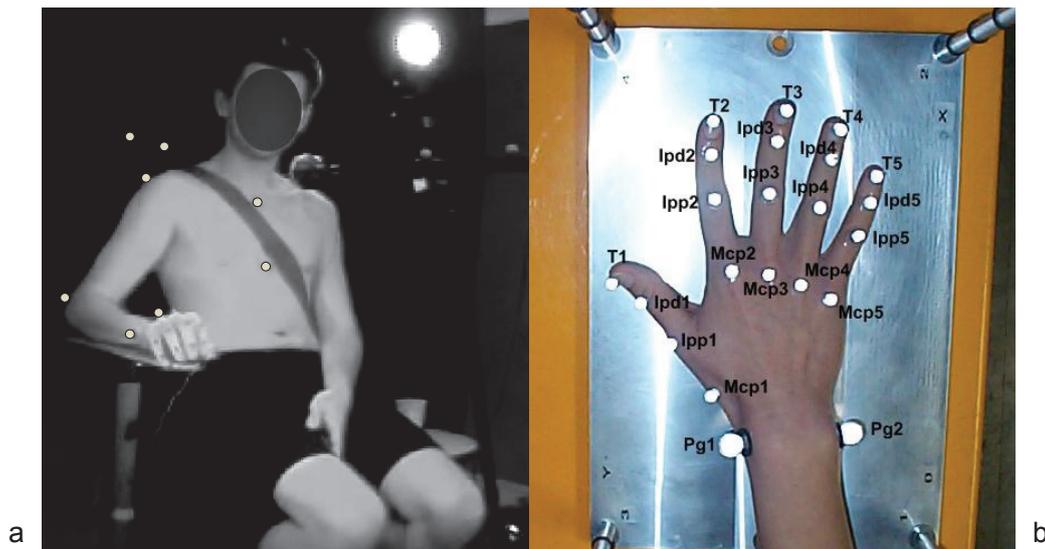


Figure 3-2. Positionnement des marqueurs sur le sujet. a. Situation de repos du sujet avec emplacement des marqueurs du torse au poignet. b. Emplacement et nom des marqueurs de la main.

3.2.2.2. Reconstruction des mouvements

Il existe différentes méthodes de reconstruction de mouvement (voir (Ausejo and Wang, 2009) pour une revue). Nous avons choisi ici d'utiliser l'algorithme de cinématique inverse développé à l'Ifsttar (Monnier et al., 2009a) pour reconstruire tous les mouvements à partir des trajectoires des marqueurs. Le modèle cinématique du corps entier utilisé est basé sur le modèle du mannequin commercial RAMSIS™. Plusieurs étapes préparatoires sont nécessaires avant de calculer les angles articulaires :

- _ Etape 1 : Définition d'un avatar numérique du sujet réel à partir des dimensions anthropométriques mesurées.
- _ Etape 2 : Vérification et ajustement du modèle digital créé à l'étape 1 en termes de dimensions anthropométriques. Cela consiste en une inspection visuelle en superposant le modèle numérique et différentes photos d'une posture de référence. Le logiciel RPx permet alors d'ajuster entre autres la longueur des segments et des angles articulaires afin de faire correspondre au mieux le modèle numérique avec la posture de référence.
- _ Etape 3 : Attachement des marqueurs. Une fois le modèle numérique correctement superposé, chaque marqueur est associé à un segment ce qui permet de calculer ses coordonnées locales dans le repère du segment considéré.

Après ces étapes préparatoires effectuées individuellement pour chaque sujet, les reconstructions de mouvements ont été faites pour calculer les angles articulaires. Cela consiste en une minimisation de la distance entre la position de marqueurs sur le modèle numérique (basé sur RAMSIS™) et la position des marqueurs mesurée par le système de capture. L'ensemble de ces étapes de reconstruction est détaillé dans le mémoire de master de B. Condi qui a effectué cette partie du traitement (Condi, 2008).

3.2.2.3. Tri des données

Etant données les pertes de marqueurs, des essais n'ont pas pu être reconstruits. De plus, les participants avaient pour instruction de ne pas bouger le torse durant la rotation. Cependant, pour les fortes amplitudes de rotation, cette instruction était difficile à suivre. Par une inspection visuelle des mouvements enregistrés, la plupart des participants ont été en mesure de respecter cette instruction jusqu'à une amplitude de $\pm 270^\circ$. Le déplacement des deux marqueurs attachés au sternum a été calculé pour chaque essai. Pour les tâches de -270° et $+270^\circ$, le 90e percentile du déplacement de ces 2 marqueurs correspond à 13mm entre le début et la fin de rotation. Tout essai présentant un déplacement d'un des deux marqueurs du torse supérieur à 13mm a été écarté pour l'analyse des données. De cette façon, seulement 5 essais auraient pu être retenus pour les tâches de $\pm 360^\circ$. Nous avons ainsi préféré éliminer l'ensemble de ces essais pour cause de représentativité statistique insuffisante. L'amplitude de rotation réellement atteinte en fin de manipulation a également été utilisée afin de vérifier le respect de la consigne sur la tâche. Les essais ayant un angle final différent de la consigne de $\pm 10^\circ$ ont également été écartés pour l'analyse des résultats. Au total, 52 essais sur un total de 240 ont été éliminés, soit 21,6% de l'ensemble des essais.

3.2.3. Définition des variables étudiées

Les mouvements enregistrés peuvent se décomposer en différentes phases : la phase d'atteinte, de la posture de repos à la saisie, la phase de manipulation, du début à la fin de rotation de l'objet, et la phase de retour à la posture de repos.

3.2.3.1. Détection des phases de mouvement

A partir des deux marqueurs sur les styloïdes ulnaire et radiale, le centre du poignet est estimé comme étant le milieu de ces deux points. La vitesse tangentielle (V) de ce point a été calculée afin de déterminer les bornes de la phase d'atteinte. L'initiation du mouvement d'atteinte (t_1) a été déterminée comme le premier instant où V dépasse la limite de 5% du pic de vitesse (V_{pic}). L'instant où l'objet est atteint (t_2) est défini comme étant l'instant où V est minimum entre l'instant de V_{pic} et le début de la phase de manipulation (t_3).

A partir des 4 marqueurs fixés sur le support de la sphère, l'angle de rotation de la sphère ainsi que sa vitesse angulaire ont été calculés. Le début (t_3) et la fin (t_4) de la phase de manipulation ont été déterminés à partir d'un seuil de vitesse angulaire, fixé à 10% du pic de vitesse angulaire de l'objet. L'ensemble de ces données est représenté Figure 3-3. Il faut noter sur l'exemple présenté les valeurs de minima locaux dans la vitesse angulaire, correspondant aux légers changements de résistance à chaque incrément de 45° .

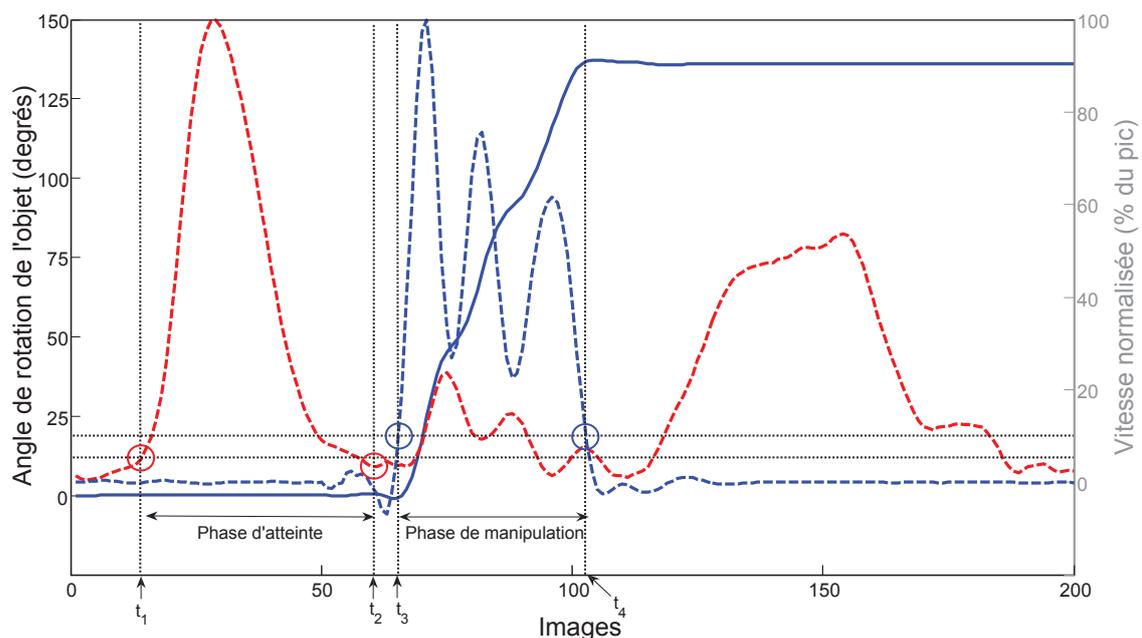


Figure 3-3. Principe de détection des phases. L'angle de l'objet parcouru est représenté en bleu plein pour une tâche de rotation de 135° , tandis que sa vitesse de rotation est en pointillé bleu. La vitesse tangentielle du déplacement du poignet est représentée en pointillés rouge.

3.2.3.2. Paramètres caractérisant la posture du bras

Si l'on considère un modèle de bras à 7ddl (3 à l'épaule, 2 au coude et 2 au poignet), le système est alors redondant pour la tâche et présente un grand nombre de variables à analyser. Cependant, il est possible de le simplifier en ramenant les 3 angles de l'épaule à un seul en utilisant la notion d'angle de pivot (Korein, 1985 ; van der Vaart, 1995 ; Tolani and Badler, 1996 ; Wang, 1999b), également appelé « angle d'élévation du coude » en robotique (Kim et al., 2006).

Dès lors, 4 degrés de libertés définissent le système impliqué dans la tâche de rotation proposée aux sujets : l'angle de pivot (PIV), l'angle de prono-supination (SUP) et les angles de flexion (FLE) et abduction (ABD) du poignet. L'angle de pivot se définit comme l'angle entre le plan formé par les centres articulaires de l'épaule, du coude et du poignet et le plan vertical contenant l'axe épaule-poignet. L'angle de pivot 0 est défini lorsque le coude se trouve dans le plan vertical, sous l'axe de rotation. Le sens positif de rotation est le même que celui de l'axe épaule-poignet (voir Figure 3-4). Les angles 0 de SUP, FLE et ABD sont quant eux définis dans le modèle RAMSIS™. La supination est positive et la pronation négative.

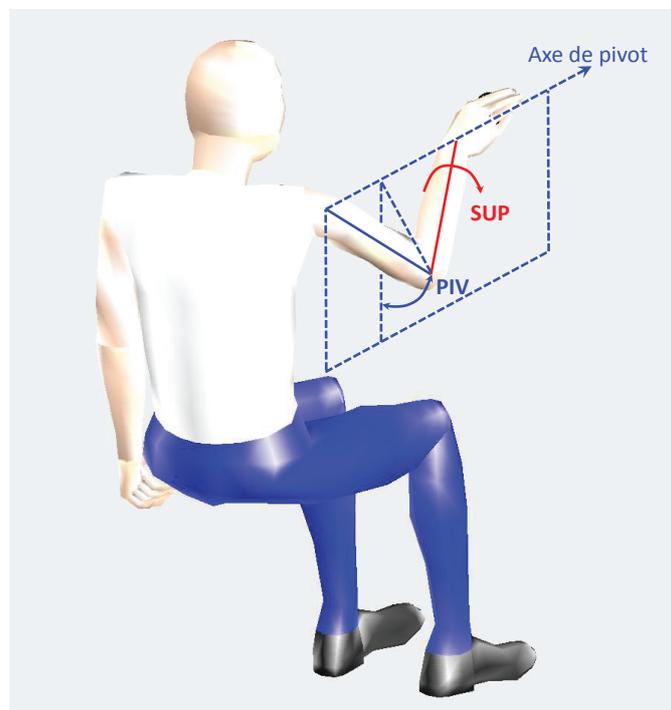


Figure 3-4. Description de la simplification des degrés de liberté du bras.

Une multitude de points de contacts existe entre la main et la sphère. Afin de simplifier cet ensemble de points, nous ne considérerons qu'un point unique, défini comme étant le point unique de la sphère ayant pour vecteur normal, \vec{n} , celui de la paume de main (considérée comme étant un plan). Dans le repère centré au milieu de la sphère, il est alors possible de définir les coordonnées sphériques (δ, θ) du point P à partir des relations suivantes :

$$\begin{cases} P_x = n_x = \rho \cdot \cos \theta \cdot \cos \delta \\ P_y = n_y = \rho \cdot \sin \theta \cdot \cos \delta, \\ P_z = n_z = \rho \cdot \sin \delta \end{cases}$$

avec $\begin{cases} \delta: & \text{latitude du point } P \\ \theta: & \text{longitude du point } P \\ \rho: & \text{rayon de la sphère} \end{cases}$

3.2.3.3. Paramètres temporels des différentes phases

Afin de déterminer si la trajectoire de la main durant l'atteinte est affectée par l'amplitude de la tâche à réaliser, les paramètres temporels suivants ont été calculés à partir de la trajectoire reconstruite du poignet, ainsi que des profils de vitesse et d'accélération :

- _ Durée totale d'atteinte de t_1 à t_2 : T_{reach} .
- _ Pic de vitesse (V_{reach}) et instant de la vitesse pic absolu et relatif (TPV et TPVr) durant la phase d'atteinte.
- _ Pic d'accélération (A_{peak}) et instant de l'accélération pic, absolu : TPA et relatif : TPAr.
- _ Pic de décélération (D_{peak}) et instant d'atteinte de la décélération pic, absolu : TPD et relatif : TPDr.

Dans le même but, les paramètres suivants ont été définis pour la phase de manipulation (de t_3 à t_4) :

- _ Durée de la phase manipulation : $T_{\text{manip}} (t_4-t_3)$.
- _ Vitesse angulaire pic de l'objet : W_{peak} .
- _ Instant de la vitesse maximale de rotation de la phase manipulation, absolu et relatif (TPW = $t(W_{\text{peak}})-t_3$, TPWr = TPW / T_{manip}).

3.2.4. Analyse statistique

L'ensemble des résultats a été analysé au moyen de tests ANOVA à 2 facteurs, en prenant comme variables indépendantes la valeur absolue de l'amplitude de rotation (45, 90, 135, 180, 225, 270 et 315) et la direction (horaire et antihoraire).

3.3. Résultats

3.3.1. Caractéristiques temporelles de l'atteinte

La tâche de rotation dans cette expérimentation est définie par deux paramètres: le sens de rotation et son amplitude. Pour ce qui est des paramètres temporels de la phase d'atteinte, exposés dans le Tableau 3-1, il est intéressant de noter que la durée de la phase d'atteinte (T_{reach}) augmente avec l'amplitude de rotation, tandis que les durées d'atteinte des pics de vitesse (TPV), d'accélération (TPA) et de décélération (TPD) ne sont affectées ni par la direction, ni par l'amplitude de rotation de l'objet. Cela implique que seule la durée entre le pic de décélération et la fin de la phase d'atteinte augmente significativement avec l'amplitude de rotation. Etant donnée la variation de T_{reach} , les durées relatives d'atteinte de pics de vitesse et de décélération (TPVr et TPD_r), sont significativement différentes en fonction de l'amplitude de rotation ($F(6,187)=5,91$, $p<0,001$ pour T_{reach} ; $F(6,187)=3,01$, $p=0,008$ pour TPVr et $F(6,187)=3,45$, $p=0,003$ pour TPD_r). Il semblerait qu'il y ait également un effet significatif du sens de rotation sur les valeurs pic de vitesse, accélération et décélération, avec des valeurs plus importantes pour les rotations dans le sens horaire ($F(1,187)=30,19$, $p<0,001$ pour V_{peak} ; $F(1,187)=23,78$, $p<0,001$ pour A_{peak} et $F(1,187)=4,35$, $p=0,039$ pour D_{peak} , voir Tableau 3-1).

3.3.2. Caractéristiques temporelles de la phase de manipulation

Comme pour la phase d'atteinte, la tâche a un effet significatif sur les caractéristiques temporelles de la phase de manipulation (voir Tableau 3-2). Le temps de manipulation (T_{manip}) augmente avec l'amplitude de rotation ($F(6,187)=32,75$, $p<0,001$). La durée d'atteinte de la vitesse de rotation pic est également significativement croissante avec l'amplitude de rotation (TPW : $F(6,182)=5,01$, $p<0,001$), tandis que sa valeur relative (TPWr) ne semble pas être

affectée ($F(6,182)=1,68$, $p=0,1295$). Il faut cependant noter ici une très forte variabilité interindividuelle dans ces deux variables. Enfin, la vitesse de rotation pic (W_{peak}) varie également significativement avec le sens ($F(1,182)=784,28$, $p<0,001$) et l'amplitude de rotation ($F(6,182)=5,98$, $p<0,001$) et présente une forte variabilité (vitesses de rotations s'étalant de $118,84^{\circ} \cdot s^{-1}$ à $800,95^{\circ} \cdot s^{-1}$).

Tableau 3-1. Caractéristiques spatio-temporelles de l'atteinte en fonction de l'amplitude de rotation. Les données présentées sont sous la forme « Moyenne (Ecart type) », tous sujets confondus.

Amplitude	T _{reach} s	TPV s	TPA s	TPD s	TPVr % T _{reach}	TPAr % T _{reach}	TPDr % T _{reach}	V _{peak} m.s ⁻¹	A _{peak} m.s ⁻²	D _{peak} m.s ⁻²
-315	1,35 (0,35)	0,37 (0,07)	0,18 (0,07)	0,53 (0,11)	28,41 (7,58)	13,8 (7,23)	41,56 (12,5)	0,64 (0,13)	3,36 (1,42)	-2,28 (1,05)
-270	1,17 (0,29)	0,36 (0,05)	0,18 (0,05)	0,51 (0,07)	31,96 (7,51)	15,81 (5,16)	45,43 (10,55)	0,71 (0,13)	3,28 (0,72)	-2,33 (0,99)
-225	1,21 (0,24)	0,36 (0,08)	0,21 (0,06)	0,61 (0,18)	30,36 (7,19)	17,05 (4,61)	51,06 (14,29)	0,69 (0,15)	3,3 (1,12)	-2,45 (0,67)
-180	1,17 (0,19)	0,34 (0,08)	0,18 (0,06)	0,52 (0,08)	29,11 (6,80)	15,23 (5,25)	45,55 (10,51)	0,73 (0,11)	3,51 (0,81)	-2,35 (0,69)
-135	1,06 (0,17)	0,34 (0,06)	0,17 (0,08)	0,49 (0,10)	32,83 (7,78)	15,86 (7,40)	46,88 (9,48)	0,75 (0,15)	3,63 (1,12)	-2,54 (0,67)
-90	1,05 (0,22)	0,35 (0,07)	0,18 (0,07)	0,53 (0,11)	34,11 (7,51)	17,26 (6,23)	51,33 (12,99)	0,74 (0,14)	3,65 (1,21)	-2,61 (0,67)
-45	0,99 (0,16)	0,34 (0,07)	0,18 (0,05)	0,53 (0,14)	34,67 (5,68)	18,27 (5,63)	53,68 (10,10)	0,74 (0,16)	3,68 (1,49)	-2,66 (0,88)
45	1,05 (0,23)	0,32 (0,05)	0,19 (0,05)	0,51 (0,13)	31,19 (4,24)	17,73 (3,71)	49,86 (12,85)	0,8 (0,14)	4,25 (1,16)	-2,55 (0,65)
90	1,01 (0,17)	0,34 (0,06)	0,19 (0,05)	0,53 (0,10)	33,62 (6,41)	19,03 (4,74)	53,63 (12,21)	0,82 (0,10)	4,17 (0,77)	-2,59 (0,60)
135	1,06 (0,17)	0,32 (0,07)	0,19 (0,09)	0,49 (0,05)	30,58 (6,15)	18,12 (8,33)	47,4 (8,47)	0,83 (0,13)	4,48 (0,95)	-2,67 (0,81)
180	1,11 (0,22)	0,33 (0,06)	0,18 (0,05)	0,51 (0,08)	30,63 (4,95)	16,71 (5,68)	46,76 (10,58)	0,82 (0,12)	4,07 (0,75)	-2,49 (0,65)
225	1,16 (0,19)	0,33 (0,09)	0,16 (0,06)	0,48 (0,11)	28,61 (8,90)	13,55 (4,21)	42,6 (12,06)	0,82 (0,17)	4,47 (1,33)	-2,51 (0,84)
270	1,2 (0,32)	0,36 (0,04)	0,2 (0,06)	0,56 (0,10)	31,56 (6,70)	17,34 (5,85)	45,61 (10,03)	0,87 (0,16)	4,35 (1,14)	-2,88 (0,88)
315	1,37 (0,30)	0,34 (0,09)	0,2 (0,06)	0,5 (0,17)	25,34 (6,64)	15,12 (4,72)	37,33 (9,67)	0,87 (0,15)	4,62 (1,28)	-3,32 (1,04)

L'ensemble de ces données est représenté graphiquement dans l'annexe A.

Tableau 3-2. Caractéristiques temporelles de la phase de manipulation.

Amplitude	T _{manip} s	TPW s	TPWr % de T _{manip}	W _{peak} °.s-1
-315	1,5 (0,5)	0,6 (0,3)	40,2 (19,9)	-433,8 (164,5)
-270	1,6 (0,4)	0,5 (0,4)	29,7 (19,6)	-440,9 (232,6)
-225	1,2 (0,5)	0,7 (0,5)	54,7 (28,0)	-330,0 (122,1)
-180	1,2 (0,2)	0,5 (0,2)	44,8 (18,2)	-300,2 (89,2)
-135	1,1 (0,4)	0,5 (0,4)	42,2 (25,2)	-268,3 (131,3)
-90	0,8 (0,3)	0,4 (0,3)	50,8 (24,0)	-248,0 (160,1)
-45	0,5 (0,2)	0,2 (0,1)	46,2 (18,3)	-214,7 (53,1)
45	0,4 (0,1)	0,2 (0,1)	53,9 (11,4)	227,6 (88,4)
90	0,7 (0,3)	0,3 (0,2)	35,3 (15,2)	270,4 (127,1)
135	1,1 (0,5)	0,5 (0,4)	45,7 (27,3)	327,5 (134,3)
180	1,1 (0,4)	0,4 (0,4)	35,7 (28,6)	323,6 (151,4)
225	1,3 (0,4)	0,4 (0,3)	36,9 (21,7)	398,7 (137,7)
270	1,4 (0,6)	0,6 (0,6)	36,7 (22,8)	393,4 (165,8)
315	1,8 (0,6)	0,4 (0,2)	26,5 (18,2)	337,5 (118,8)

3.3.3. Position et posture de saisie

3.3.3.1. Position de saisie sur la sphère

Pour chaque saisie, de multiples points de contacts existent entre la sphère et la main du sujet. Pour raison de simplification, nous nous proposons ici de restreindre la position de saisie à un seul point de contact pour chaque saisie. Nous définissons ce dernier comme étant le point unique de la sphère ayant pour vecteur normal, celui de la paume de main. Ainsi, les coordonnées de ce point de contact peuvent s'exprimer soit en coordonnées sphériques (θ, δ), centrées sur le centre de la sphère ou en coordonnées dans le repère global.

La répartition de ces points de contact selon amplitude de rotation pour tous les sujets est représentée Figure 3-5. On constate un effet significatif de la direction et de l'amplitude de rotation sur ce point de contact. En effet, la saisie de la sphère pour une rotation en sens horaire se fait principalement sur la moitié gauche et supérieure de la sphère, en allant du milieu pour les petites amplitudes vers le côté pour les amplitudes plus importantes. A l'opposé, la saisie pour les rotations en sens antihoraire est localisée sur le côté droit en partant du milieu supérieur pour les faibles amplitudes vers le dessous de la sphère pour les amplitudes plus élevées.

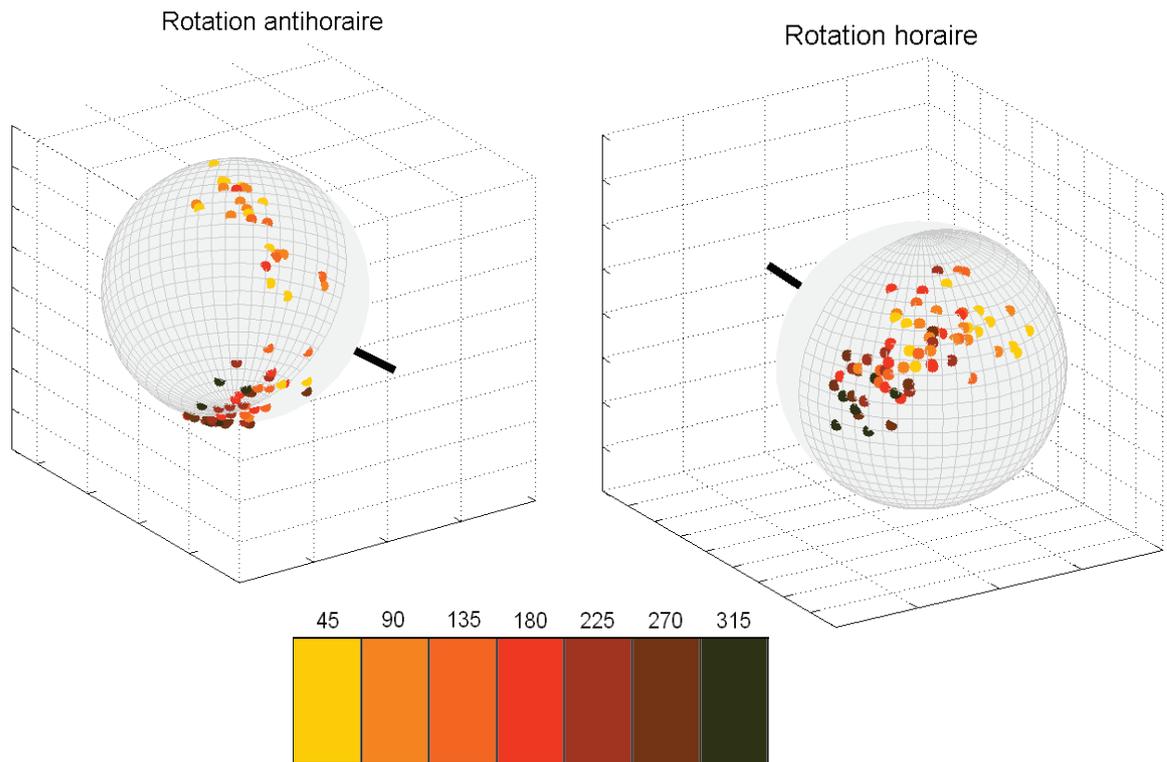


Figure 3-5. Répartition des points de contact au moment de la saisie en fonction du sens de rotation. Dans les deux cas, l'axe de rotation de la sphère est représenté en noir et l'amplitude de la tâche est représentée selon l'échelle colorimétrique sous les deux sphères.

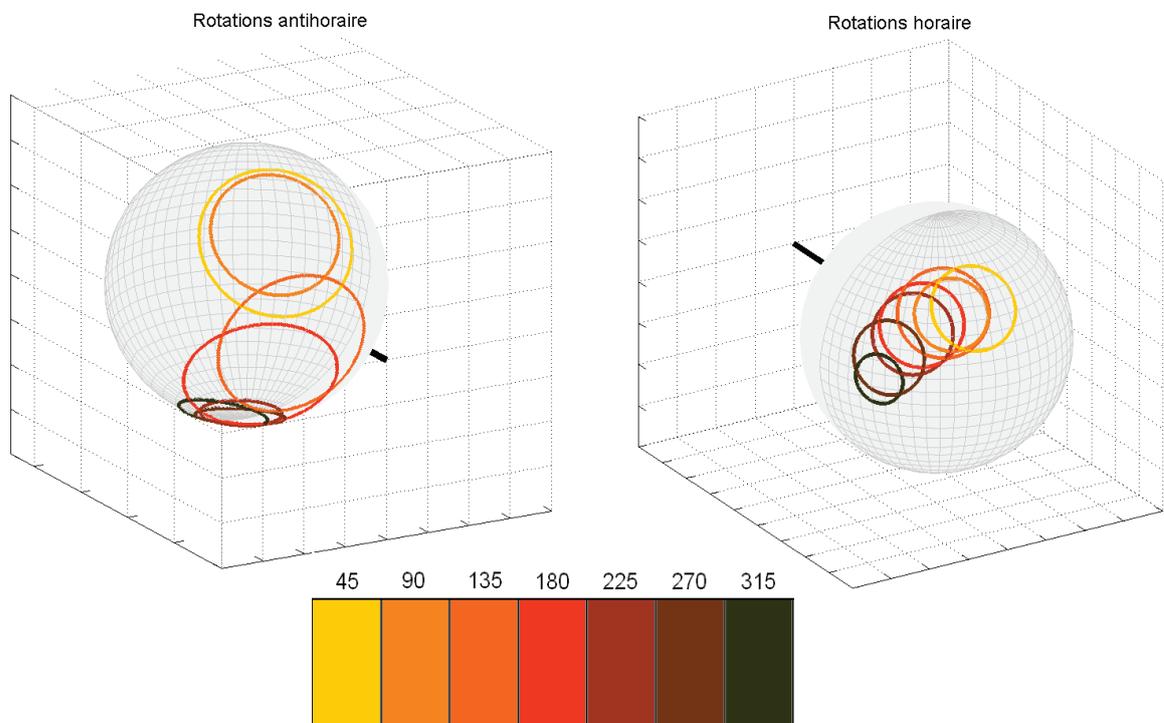


Figure 3-6. Zones de saisie en fonction de l'amplitude et du sens de rotation. Les zones sont centrées sur le barycentre de l'ensemble des points tous sujets confondus pour une amplitude donnée. Le rayon du cercle représente quant à lui la variabilité (valeur d'un écart type) de la saisie pour l'amplitude donnée.

La Figure 3-6 représente les zones de saisie (tous sujets confondus), centrées sur le barycentre des points de contact pour une amplitude donnée. Le rayon du cercle représente la variabilité interindividuelle pour chaque amplitude, représentée par l'angle moyen formé entre chaque point de contact et le barycentre. On constate ainsi que la variabilité est plus importante pour les faibles amplitudes, dans les deux sens, et plus importante dans le sens antihoraire en général.

3.3.3.2. Posture de début de rotation

La posture de début de rotation correspond à la position du bras quand le sujet commence à tourner la sphère. On constate un effet fortement significatif du sens et de l'amplitude de rotation ainsi que de leur interaction sur PIV et SUP. Les observations principales (Figure 3-7) sont :

- _ Pour les rotations dans le sens antihoraire, les sujets préfèrent conserver le coude proche du corps (PIV proche de 0°) et augmentent SUP rapidement avec la contrainte de l'amplitude.
- _ On constate une forte dispersion des données pour SUP dans le sens antihoraire et particulièrement pour les faibles amplitudes (-45° , -90° , -135° et -180°). En effet, les écarts types sont respectivement de 42, 53, 51 et 51 degrés.
- _ Pour les rotations dans le sens horaire, les participants saisissent la sphère avec l'avant-bras en pronation quasi complète (environ 60° en moyenne pour SUP) et élèvent le coude de manière linéaire en fonction de l'amplitude.

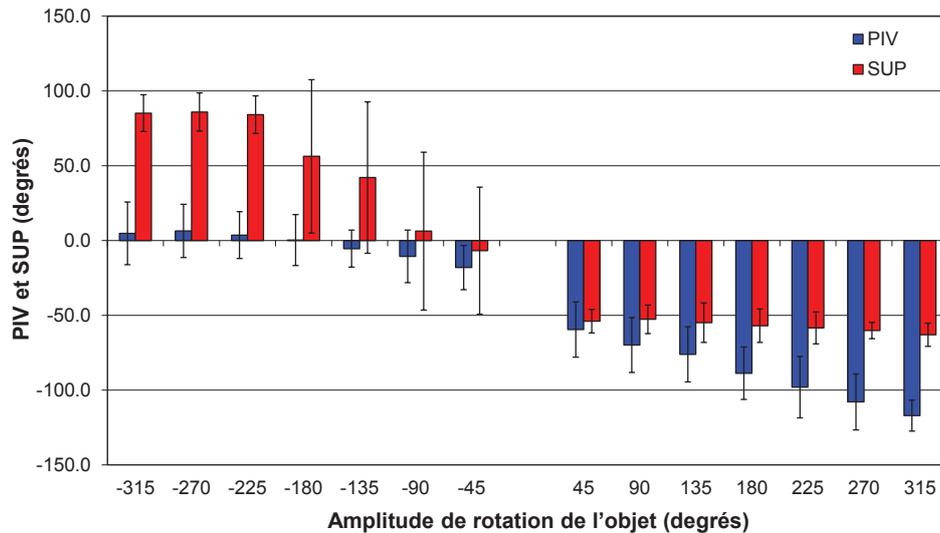


Figure 3-7. Moyennes et écarts types des angles PIV (en bleu) et SUP (en rouge) au début de la rotation en fonction de l'amplitude.

Cette variabilité observée se constate également au niveau intra-individuel. En effet, pour les tâches de $+90^\circ$ et -90° , 3 répétitions ont été effectuées. Le Tableau 3-3 expose les différences maximales de SUP et PIV entre les 3 répétitions d'un sujet au début et à la fin de la rotation. Pour les essais à -90° , on observe une plus grande variation pour SUP que pour PIV que ce soit intra- ou interindividuel au début de la manipulation. Ainsi, pour le sujet 5 par exemple, la différence maximale entre les 3 répétitions à -90° s'élève à 144,8. Cela implique que le sujet a adopté au moins deux postures opposées en début de manipulation : une avec SUP présentant une pronation importante et une autre en supination. Il est intéressant de noter que la plage de variation de SUP est plus faible en fin de rotation (une différence maximale de $101,2^\circ$ par exemple pour le sujet 5). Cette diminution est néanmoins compensée par une élévation de la variabilité de PIV. A l'inverse, pour les tâches à $+90^\circ$, de plus grandes variations sont observables pour PIV au début de la manipulation.

Tableau 3-3. Evaluation de la variabilité intra-individuelle. Différences maximales pour PIV et SUP entre les 3 répétitions des tâches de +90° et -90°, au début (d) et à la fin (f) de la manipulation.

Sujet	-90°				+90°			
	PIV _d	SUP _d	PIV _f	SUP _f	PIV _d	SUP _d	PIV _f	SUP _f
1	/	/	/	/	11,8	5,4	6,5	1,0
2	8,7	75,8	22,8	39,5	24,1	2,5	25,1	8,8
3	23,5	53,8	40,3	34,7	11,9	2,5	24,1	10,8
4	3,3	6,9	11,7	20,8	15,9	11,8	18,3	9,7
5	11,1	144,8	25	101,2	17,1	4,2	7,4	14,9
6	/	/	/	/	10,3	11,2	20	28,2
7	23,3	12,7	25,5	9,7	14,2	3,3	19,1	2,7
8	7,3	45,7	4,5	36,3	20	5	14,5	10,6
9	6,6	109,7	50	66,7	30,6	21,4	26,2	25,7
10	35,6	76,1	70	28,5	18,5	4,4	23,7	32,3
11	12,8	17,2	12,5	24,7	36,4	6,6	13,3	24,9
12	32,1	97,5	60,8	71,4	11	20,4	20,9	24,8
Moyenne	16,4	64	32,3	43,3	18,5	8,2	18,3	16,2
Ecart type	11,4	45,4	22,1	27,9	8,2	6,6	6,6	10,5

3.3.4. Posture de fin de manipulation

La posture de fin de manipulation correspond à la position du bras en fin de rotation, avant que le sujet ne relâche sa saisie. Tout comme pour la posture de début de manipulation, on constate un effet significatif du sens, de l'amplitude de rotation et de leur interaction sur PIV et SUP. Les observations majeures (Figure 3-8) sont :

- _ Pour les rotations dans le sens antihoraire, l'angle de prono-supination atteint une valeur presque constante d'environ 30° pour les amplitudes allant de -45° à -180°. Pour des amplitudes de rotation plus élevées, SUP augmente ensuite linéairement pour se rapprocher de sa valeur limite. De manière générale, on observe une augmentation de l'angle de pivot final avec l'amplitude de rotation. On constate également une forte dispersion interindividuelle pour PIV et SUP pour les faibles amplitudes de rotation (de -45° à 180°). Cependant, cette variabilité est diminuée par rapport au début de rotation.
- _ Pour les tâches dans le sens horaire, l'angle final de prono-supination (SUP) varie de manière quasiment linéaire avec l'amplitude de rotation jusqu'à la tâche de +270° et atteint ensuite un plateau pour les amplitudes supérieures. De la même façon, on observe de faibles variations de PIV, avec des valeurs gardant le coude proche du

corps pour les amplitudes élevées. Il faut également noter ici une forte dispersion des valeurs de PIV et SUP pour les faibles amplitudes de rotation de l'objet (de 45° à 180°) tout comme pour les postures de début de rotation.

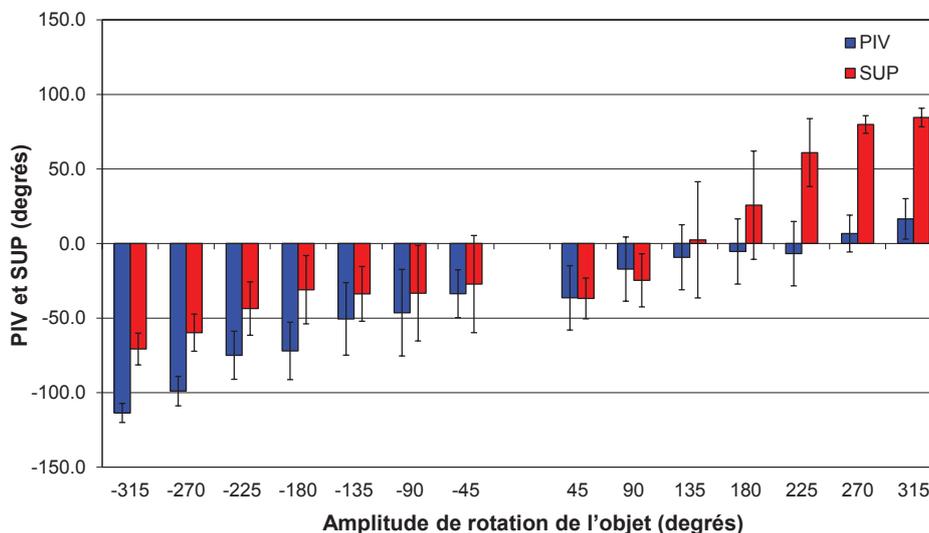


Figure 3-8. Moyennes et écarts types des angles PIV (en bleu) et SUP (en rouge) en fin de rotation en fonction de l'amplitude.

3.3.5. Evolution des degrés de liberté du bras au cours de la manipulation

Différentes stratégies de contrôle peuvent exister pour tourner l'objet au cours de la tâche proposée, en fonction de la façon dont PIV et SUP sont utilisés pour orienter la main. Afin d'étudier lequel de PIV ou SUP est le plus sollicité afin d'effectuer la tâche, leurs variations entre le début et la fin de rotation ont été normalisées par leur amplitude maximale respective (différence entre les maxima relevés, tous essais confondus), et ce de manière individuelle :

$$\Delta\theta_N = \frac{(\theta_f - \theta_d)}{(\theta_{max} - \theta_{min})} * 100,$$

avec

$$\begin{cases} \Delta\theta_N: & \text{Variation normalisée du ddl considéré} \\ \theta_f: & \text{Valeur du ddl en fin de rotation} \\ \theta_d: & \text{Valeur du ddl en début de rotation} \\ \theta_{max}: & \text{Valeur max du ddl} \\ \theta_{min}: & \text{Valeur min du ddl} \end{cases}$$

Une fois normalisées, les variations de ces deux angles peuvent alors être comparées. Les variations normalisées de PIV et SUP (ΔPIV_N et ΔSUP_N) sont représentées Figure 3-9. Un test de Student apparié entre ΔPIV_N et ΔSUP_N est effectué pour chaque amplitude. Les résultats significatifs sont également représentés Figure 3-9. Les observations principales sont :

- _ Dans le sens antihoraire, il semble que la prono-supination soit préférée au pivot. En effet, de plus grandes variations de SUP s'observent généralement, avec en particulier une différence significative avec PIV pour les tâches à -225° et -270° .
- _ Pour les rotations dans le sens horaire, on constate une participation globalement légèrement supérieure de PIV, bien que la différence entre les deux ddl ne soit pas significative, excepté pour la tâche à 90° .

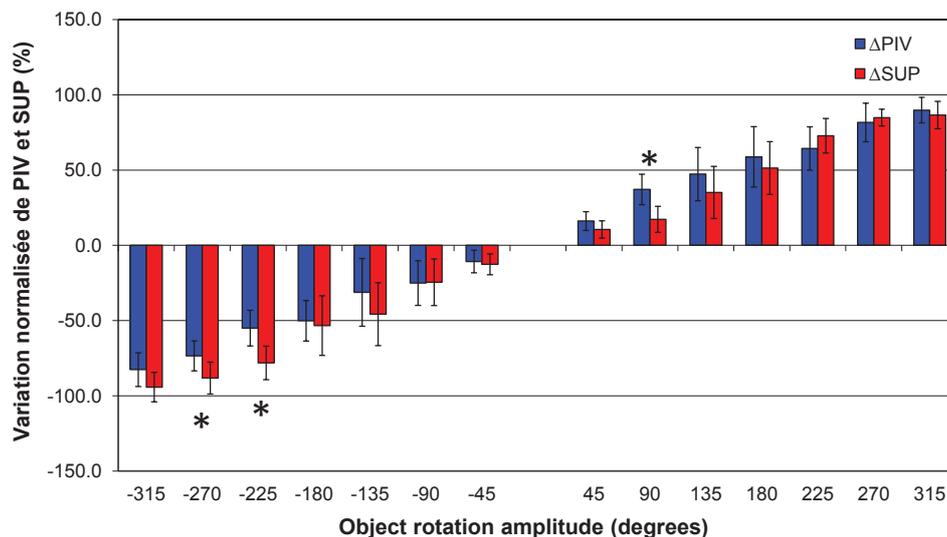


Figure 3-9. Différence normalisée des angles PIV (en gris) et SUP (en noir) entre le début et la fin de rotation en fonction de l'amplitude de rotation. Les * mettent en avant les différences significatives entre PIV et SUP pour l'amplitude considérée : * $p < 0.05$

3.4. Discussions

Nous nous sommes intéressés dans ce chapitre aux effets de la tâche de manipulation (amplitude et direction) sur les différentes phases du mouvement en considérant l'ensemble de ses phases. Les différents résultats exposés nous permettent de constater une adaptation du geste d'atteinte en particulier dans les derniers instants précédant la saisie. D'autre part, nous

avons pu également constater un ajustement de la posture du bras en début de rotation, autrement dit, une anticipation posturale en fonction de la tâche demandée aux sujets, associée à une modification du point de saisie en fonction de l'amplitude de rotation. La stratégie d'anticipation dépend fortement du sens de rotation, ce qui confirme des résultats préliminaires avancés sur ces mêmes données (Robert et al., 2009). Des conclusions similaires ont également été avancées plus récemment sur une tâche de rotation de boutons sphériques (Herbort and Butz, 2010). Les sujets ici ont anticipé la tâche de rotation en adoptant un angle de pronation proche de leur limite pour les rotations dans le sens horaire, quelle que soit l'amplitude de rotation. Dans le sens antihoraire, les sujets ont conservé un angle de pivot proche de 0° (soit près du corps). Lorsque la tâche de rotation demandée est augmentée dans le sens horaire, l'anticipation se fait par une élévation progressive du coude à l'état initial de la rotation, ce qui permet une position finale du coude proche du plan vertical. A l'inverse, pour les rotations dans le sens antihoraire, l'anticipation se fait principalement par l'angle de prono-supination, augmentant rapidement quand l'amplitude demandée augmente. Cela permet entre autre de limiter l'élévation du coude en fin de manipulation. Nous avons également noté une forte variabilité des résultats, en particulier pour SUP, au début des rotations antihoraires, suggérant l'utilisation de différentes stratégies. Durant la phase de manipulation à proprement parler, la prono-supination (SUP) semble être préférée à l'utilisation du pivot pour réaliser la tâche dans le sens antihoraire, tandis qu'il ne semble pas y avoir de différence significative dans le sens horaire. D'autre part, bien qu'un effet significatif de la tâche ait été observé sur la durée d'atteinte absolue de la vitesse pic de rotation, ceci n'est pas retrouvé une fois analysé relativement au temps de manipulation total. Il semblerait donc que le rapport entre les durées des étapes de début de rotation et de fin de rotation soit constant avec un rapport d'environ 40-60 sur la durée totale de manipulation.

3.4.1. Caractéristiques temporelles de l'atteinte et de la manipulation

Les résultats ont mis en avant un effet marqué de la tâche sur les caractéristiques temporelles de la phase d'atteinte. Ces observations confirment les conclusions antérieures obtenues sur des mouvements d'atteinte et de saisie par Wang (Wang, 1999b). En effet, ce dernier a observé une augmentation du temps d'atteinte lorsque l'orientation d'un cylindre à saisir était modifiée (d'une saisie pouce vers le haut, cylindre vertical à une orientation pouce

vers le bas). Dans notre cas, l'augmentation de la durée d'atteinte ne peut être reliée à l'orientation de l'objet, car nous avons utilisé une sphère. Cependant, en augmentant l'amplitude de la tâche demandée aux sujets, un changement d'orientation de la main est observé, dû à l'anticipation du sujet. En accord avec les observations de Wang, nous observons que seule la phase de décélération est significativement modifiée. En effet, cette phase se voit allongée quand l'amplitude de la tâche de rotation à venir est augmentée. Cela peut s'expliquer par un besoin de temps plus important pour ajuster la posture de saisie. En effet, le champ de possibilités de posture de saisie pour réaliser la tâche demandée se restreint avec l'augmentation de l'amplitude de rotation, en particulier si le sujet veut respecter toutes les contraintes à suivre selon la consigne (pas de mouvement du torse, ne pas lâcher l'objet durant toute la rotation). De plus, s'ajoutent au respect de la consigne, les contraintes physiques de butées articulaires limitant la réalisation de la tâche. L'ensemble de ces contraintes engendre une difficulté croissante avec l'amplitude de rotation. Le fait que seule la phase de décélération soit modifiée s'explique par le fonctionnement des boucles de contrôle dans le geste d'atteinte. En effet, la première partie du mouvement est une phase balistique où le mouvement est initié (Jeannerod, 1981 ; Jeannerod, 1984 ; Rosenbaum, 2010). Et c'est seulement à l'approche de l'objet que les boucles de rétrocontrôle ajustent le mouvement en fonction des contraintes. Dès lors, si la difficulté augmente, la loi de Fitts peut expliquer l'augmentation de la phase d'atteinte (Fitts, 1954), en particulier sur la dernière partie de l'atteinte où le sujet doit ajuster sa saisie.

Si l'on s'intéresse désormais aux caractéristiques temporelles de la phase de manipulation, on constate une forte variabilité interindividuelle des différentes variables, particulièrement pour la vitesse pic de rotation (W_{peak}). Cela peut s'expliquer par les instructions données aux sujets. En effet, aucune contrainte de vitesse n'était donnée et chaque sujet avait sa propre préférence pour la vitesse de rotation. On peut en effet constater grâce aux répétitions à $\pm 90^\circ$ que la variabilité intra-individuelle est plus faible (en moyenne $134^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ pour l'écart-type tous sujets confondus contre un écart-type individuel moyen de $64^\circ \cdot \text{s}^{-1}$). Si l'on s'intéresse plus en détails aux profils temporels de manipulation, nous pouvons constater une constance dans le rapport entre les durées de début et de fin de rotation. En effet, la vitesse pic de rotation est atteinte aux environs de 40% du temps total de manipulation, quelle que soit la tâche demandée. La phase finale qui consiste à atteindre la cible ne semblerait donc pas nécessiter plus de temps lorsque l'amplitude augmente. Nous pouvons en conclure que l'amplitude de la rotation ne peut être caractérisée comme étant une difficulté. En effet, si les sujets avaient

ressenti la tâche comme étant plus difficile, ou nécessitant plus de précision, nous aurions pu nous attendre à observer un allongement de cette seconde partie de la manipulation.

3.4.2. Implications au contrôle postural

De façon à éviter les limites articulaires au cours du mouvement de rotation, une posture initiale adaptée à la tâche demandée doit être adoptée, en particulier pour les fortes amplitudes. Par exemple, conserver une posture de saisie comme celle utilisée pour la tâche de $+45^\circ$ peut ne pas être adaptée à la rotation de $+180^\circ$. Mais l'anticipation à la saisie est-elle simplement nécessaire pour éviter les limites articulaires ? Il semblerait que ce ne soit pas le cas puisque différentes postures de saisie sont observées pour de faibles amplitudes telles que -45° et $+45^\circ$, tandis que les limites articulaires ne sont pas atteintes au cours de la tâche. Cela peut s'expliquer par l'espace de mouvement important permis par les limites articulaires dans le cas de faibles amplitudes. Il est alors possible pour le sujet de saisir la sphère d'un grand nombre de façons différentes. Nous avons d'ailleurs pu observer une importante variabilité des points de saisie, en particulier pour les tâches dans le sens antihoraire. Existe-t-il cependant un ou des principes de contrôle pouvant expliquer le choix des sujets ?

3.4.2.1. Principe de confort final

Une explication à l'anticipation, autre que l'évitement des butées articulaires, est que les sujets suivraient le principe de confort final, initialement décrit par Rosenbaum (Rosenbaum et al., 1990 ; Rosenbaum et al., 1996). L'hypothèse de confort final implique qu'un individu essaye d'atteindre une posture finale qui présente un confort plus important que le confort initial, quels que soient l'amplitude ou le sens de rotation. Dans notre cas, cela ne peut s'appliquer aux rotations de forte amplitude qui obligent le sujet à se rapprocher de ses limites articulaires. Dès lors, si l'on s'intéresse aux rotations de faible amplitude (de -135° à $+90^\circ$ sur la Figure 3-8), on constate des postures finale comparables tandis que les postures de début de rotation diffèrent (voir Figure 3-7). Cela semble soutenir l'hypothèse de confort final. De plus, la variabilité importante observée sur ces faibles amplitudes laisse supposer l'existence d'une famille de postures possibles présentant un degré d'inconfort comparable. Sous les conditions expérimentales présentées, les participants démarraient d'une posture de repos, pour ensuite atteindre et saisir la sphère avant d'effectuer la tâche de rotation, selon

l'amplitude demandée. Dès lors, la posture du bras au début de la rotation correspond à un état intermédiaire.

Mais nous pouvons encore nous demander si parmi l'ensemble des postures possibles, la posture observée expérimentalement présente réellement un meilleur confort en fin de rotation. Nous pourrions par la suite chercher à estimer un indice de confort afin de vérifier cette hypothèse.

3.4.2.2. Un effet dû à la gravité et au principe de travail minimum

Compte tenu de la gravité, maintenir le coude en position élevée n'est pas considéré comme une position confortable. Dans le cas de notre expérimentation, conserver une position basse du coude à la saisie évite un travail mécanique non nécessaire durant la phase d'atteinte, à partir de la position de repos. Cette préférence peut également s'expliquer par le principe de travail minimum puisque le moment d'inertie le long de l'axe de prono-supination est plus faible que celui de l'angle de pivot. De plus, conserver un coude en position basse permet de limiter l'énergie potentielle due à la gravité. Ceci confirme les conclusions de Wang sur des mouvements d'atteinte et saisie de cylindre (Wang, 1999a).

Les résultats exposés ici ne nous permettent pas de faire la part entre les deux principes exposés précédemment. En effet, les conséquences de ces principes sur le mouvement sont comparables, tout particulièrement pour les rotations dans le sens antihoraire, à savoir une conservation du coude dans une position basse. Si ces deux principes peuvent expliquer les résultats observés, nous chercherons néanmoins dans le chapitre suivant à explorer plus en détails les capacités de mouvement des sujets, afin d'obtenir une meilleure compréhension du contrôle postural sous-jacent.

4 Analyse du mouvement de manipulation par simulation en prenant en compte les butées articulaires

L'observation expérimentale sur le mouvement de rotation d'une sphère présentée dans le chapitre précédent montre clairement une anticipation de la posture de saisie en fonction de l'amplitude et du sens de rotation. Cela peut s'expliquer par plusieurs hypothèses listées ci-dessous :

- _ L'anticipation est nécessaire pour éviter les butés articulaires du bras en fin de rotation. Ceci est vrai pour une rotation de grande amplitude.
- _ L'anticipation est faite pour assurer un meilleur confort postural en fin de rotation, phénomène décrit par la théorie appelée « end-state comfort » (Rosenbaum et al., 1990). Pour objectiver le niveau de confort postural du bras, nous proposons d'estimer une distance caractérisant l'éloignement d'une posture donnée par rapport à une posture extrême autorisée par les limites articulaires. Plus une posture est éloignée des limites articulaires, plus le niveau de confort est élevé, en accord avec les fonctions d'inconfort sous forme de U proposées par différents auteurs (Cruse et al., 1990 ; Kee and Karwowski, 2001 ; Kee and Karwowski, 2003).
- _ Le principe de travail minimum (Soechting et al., 1995 ; Wang, 1999b ; Kang et al., 2005). Les sujets cherchent à limiter l'élévation du coude pour diminuer la lutte contre la gravitation et à privilégier la prono-supination par rapport à l'angle de pivot dû au fait que le moment d'inertie autour de l'axe prono-supination est plus petit que celui autour de l'axe de pivot.

Afin de vérifier ces hypothèses, nous explorerons dans ce chapitre l'espace des solutions admissibles par les limites articulaires du bras grâce au travail antérieur de Wang sur le membre supérieur (Wang et al., 1998 ; Wang, 1999a). Plus exactement, nous ferons varier la posture de saisie, caractérisée par la position de saisie par rapport à la sphère, l'orientation de la main autour de la position de saisie et l'angle de pivot du bras, par simulation. Avant de présenter les résultats de simulation en faisant varier la posture de saisie, nous rappellerons le principe de détection des butées et la méthode de simulation des postures admissibles.

4.1. Méthode de simulation de l'espace des postures admissibles par les butées articulaires

4.1.1. Rappel du principe de détection des butées articulaires

Le modèle cinématique du bras étudié dans ce chapitre possède 7 degrés de liberté (DDLs), 3 à l'épaule, 2 au coude et 2 au poignet. La gestion des butées articulaires se fait sur le principe décrit par Wang en 1999 (Wang, 1999a). Il repose sur un couplage des butées des 3 degrés de liberté de l'épaule entre eux. Cela aboutit à un cône de circumduction de l'épaule et à une surface reliant l'amplitude maximale de rotation axiale du bras à une position du coude. Ce couplage a pour avantage de considérer des limites articulaires plus réalistes qu'une prise en compte non couplée entre ces degrés de liberté. Il en est de même pour la prise en compte des limites articulaires du poignet. Les valeurs décrivant ces deux cônes de circumduction sont issues de la littérature (Wang, 1998) pour le poignet et (Engín and Chen, 1986) pour l'épaule, complétées par les limites de rotation axiale du bras (Wang et al., 1998). D'autre part, sont également prises en compte les limites de prono-supination au niveau du coude. Ces dernières sont individualisées pour chaque sujet considéré dans le 3. En effet, les valeurs extrêmes relevées au cours de la partie expérimentale ont été utilisées dans les simulations effectuées ici.

La détection des butées se fait sur le principe décrit par Wang en 1999, à savoir pour une posture du système bras + avant-bras :

- _ Vérification que le bras est compris dans le cône de circumduction de l'épaule.
- _ Vérification de la limite de rotation axiale du bras.
- _ Vérification que l'avant-bras est dans le cône de circumduction du poignet.
- _ Vérification de la rotation axiale de l'avant-bras, à savoir la prono-supination.

4.1.2. Méthode de simulation des postures admissibles

La posture de saisie dépend *a priori* de 3 facteurs :

- _ La position du point de contact entre la main (représentée par la paume) et la sphère (comme définie page 31).

- _ L'attitude² de la main autour de l'axe normal au plan de la paume passant par le point de contact. D'après notre définition de ce point de contact, l'attitude complète de la main (3 orientations) peut alors varier par une rotation autour de l'axe normal tout en conservant le même point de contact.
- _ La position du coude dans la marge de pivot possible pour une position d'épaule et une attitude (position et orientation) de main fixées.

On nomme ces facteurs respectivement i , j et k . Il est possible, par l'algorithme de simulation utilisé, de fixer un de ces paramètres afin d'étudier l'effet de ce dernier sur le mouvement de rotation.

4.1.2.1. Marge de pivot du bras

Pour une attitude (position et orientation) de main fixée sur la sphère et une position fixe de l'épaule, la redondance du membre supérieur (considérant notre modèle à 7 ddl) laisse un degré de liberté entre l'épaule et le poignet, autorisant un déplacement du coude par l'angle PIV. Grâce à un algorithme développé par Wang (Wang, 1999b), il nous est possible de calculer les deux positions extrêmes du coude permises par les limites articulaires. Le modèle utilisé est un modèle géométrique à 7 ddl, prenant en compte les limites articulaires décrites précédemment. Un exemple des deux positions extrêmes est représenté Figure 4-1. A partir de ces deux positions extrêmes, nous pouvons alors définir une marge de pivot totale M dépendante de la position de la main sur l'objet (i) ainsi que de son orientation (j).

$$\{M\} = f(i, j)$$

A partir de cette définition de la marge de pivot, il est également possible de diviser la marge totale M en deux pour une posture de bras donnée. En effet, pour une position k de coude donnée, nous pouvons définir une marge positive M^+ (entre la position du coude considérée et la position extrême selon l'axe épaule-poignet), une marge de pivot négative M^- (entre la position du coude considérée et la position extrême selon l'axe poignet-épaule). La position du coude k peut être une posture réelle observée dans la partie expérimentale ou

² Attitude de main : description de la main (dont l'origine est le poignet) en position et en orientation

Analyse du mouvement de manipulation par simulation en prenant en compte les butées articulaires

une posture simulée. Dès lors, nous pouvons exprimer ces deux sous-ensembles de la manière suivante :

$$\{M^+, M^-\} = f(i, j, k)$$

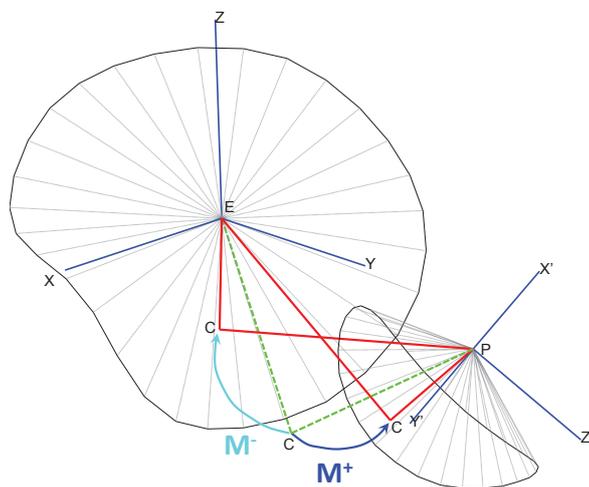


Figure 4-1. Représentation des positions extrêmes du coude autorisées par les limites articulaires. En rouge, sont représentées les postures extrêmes tandis que la posture réelle ou simulée à chaque instant est représentée en vert (Epaule -E-, Coude -C-, Poignet -P-).

4.1.2.2. Amplitude maximale de rotation

A partir d'une posture de bras donnée, il nous est possible de calculer l'amplitude maximale de rotation de l'objet permise par les limites articulaires. Pour ce faire, à partir d'une attitude de main initiale, une trajectoire fictive de l'attitude (orientation + trajectoire) de la main est générée par incréments de 1° autour de l'axe de rotation de l'objet. La capacité maximale de rotation est définie lorsque l'algorithme de suivi de trajectoire de la main n'arrive plus à trouver une posture admissible respectant l'ensemble des limites articulaires. L'opération est effectuée dans les deux sens afin d'obtenir une capacité de rotation dans le sens horaire (A^+) et dans le sens antihoraire (A^-). Ces deux capacités de rotation sont, comme pour les marges de pivot, dépendantes de la posture complète du bras :

$$\{A^+, A^-\} = f(i, j, k)$$

4.2. Résultats

4.2.1. Marges de pivot

4.2.1.1. Marges de pivot des postures initiales et finales réelles

La Figure 4-2 expose les marges de pivot au début et à la fin de rotation calculées à partir des postures réelles observées. On constate une diminution de la marge de pivot lorsque l'amplitude de rotation de l'objet augmente, quelle que soit la direction, donnant un aspect général de U inversé sur l'ensemble des tâches. De plus, l'analyse statistique montre également des différences significatives entre les marges totales de début et fin de rotation pour les amplitudes allant de -225° à 90° (avec une exception pour la tâche à -45°).

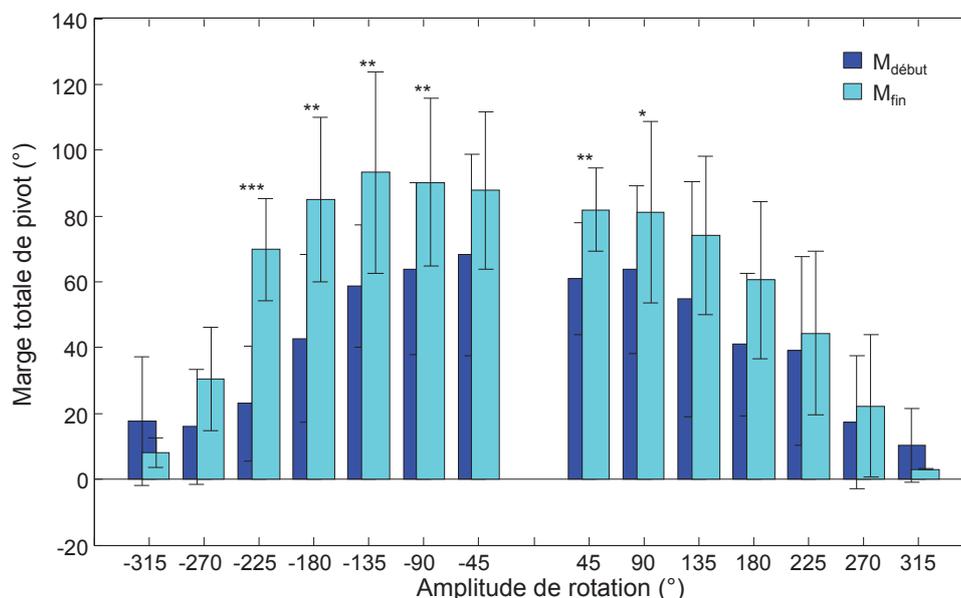


Figure 4-2. Comparaison des marges totales de pivot moyennes au début (bleu foncé) et en fin de rotation (bleu clair), associées à une barre d'erreur représentant plus ou moins un écart-type. Pour chaque amplitude, les différences significatives entre marge initiale et finale sont exposées : * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

La Figure 4-3 représente les marges négatives (M^-) et positives (M^+) au début de la rotation. On ne constate aucune différence significative entre M^- et M^+ dans le sens antihoraire, ce qui implique que les sujets positionnaient leur coude proche de la position médiane autorisée par les limites de pivot. Pour les rotations dans le sens horaire, la marge dans le sens antihoraire (M^-) semble être supérieure à la marge M^+ pour les faibles amplitudes

Analyse du mouvement de manipulation par simulation en prenant en compte les butées articulaires

(45° et 90°). Cela signifie qu'une position du coude plus basse était préférée dans la gamme des possibilités offertes par les limites articulaires.

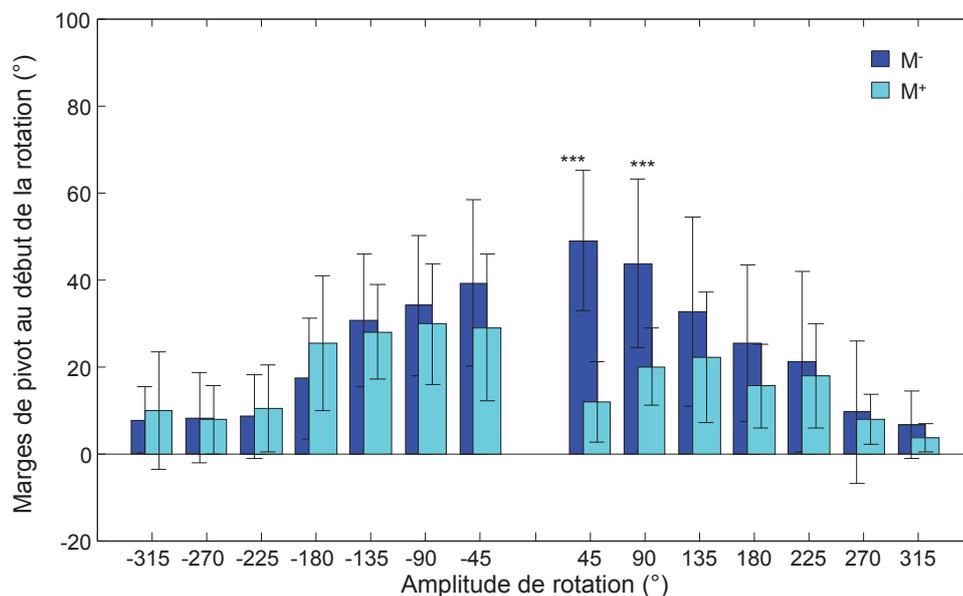


Figure 4-3. Marges de pivot négatives (M^- , bleu foncé) et positives (M^+ , bleu clair) moyennes au début de la rotation de l'objet, associées à une barre d'erreur représentant plus ou moins un écart-type. Pour chaque amplitude, les différences significatives entre M^- et M^+ sont exposées : * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

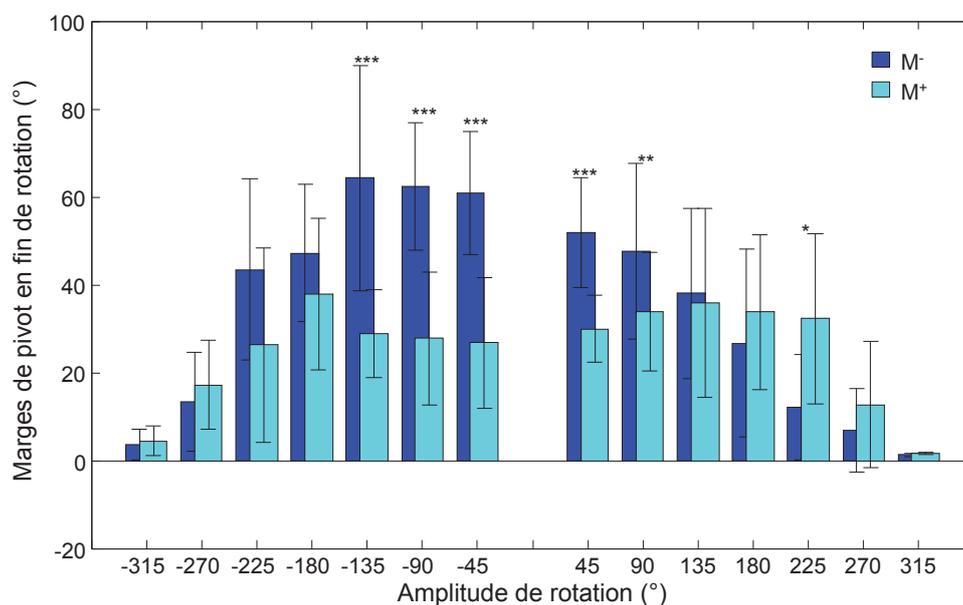


Figure 4-4. Marges de pivot négatives (M^- , bleu foncé) et positives (M^+ , bleu clair) moyennes en fin de rotation de l'objet, associées à une barre d'erreur représentant plus ou moins un écart-type. Pour chaque amplitude, les différences significatives entre M^- et M^+ sont exposées : * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

De la même façon, la Figure 4-4 expose les marges de pivot M^- et M^+ en fin de rotation. On observe sur cette figure des valeurs de M^- significativement supérieures à M^+ , pour les tâches allant de -135° à $+90^\circ$, traduisant une préférence des sujets à conserver un coude en position basse en fin de rotation.

4.2.1.2. Marges de pivot en début de rotation en fonction de l'attitude de main

Nous avons analysé dans le paragraphe précédent le choix fait par les sujets de positionner le coude de manière à éviter une élévation trop importante en début de rotation (mis en évidence par des marges de pivot dans le sens antihoraire -soit vers le haut- supérieures aux marges dans le sens horaire). Cependant, lesdites marges sont *a priori* dépendantes de l'attitude de main au moment de la saisie. Nous pouvons dès lors nous demander si les attitudes de main à la saisie sont choisies afin d'apporter un confort optimal ou non pour le point de contact considéré. Si l'on accepte l'hypothèse que le meilleur confort se situe loin des butés articulaires, nous pourrions alors nous attendre à observer des marges de pivot plus importantes pour les attitudes de mains choisies que pour le reste des attitudes possibles.

Afin de déterminer cela, à partir des postures réelles de saisie exposées dans le 3, l'attitude de main pour un essai donné est modifiée tout en conservant le point de contact i et l'angle de pivot k . La modification de l'attitude de main se fait par une rotation j autour de la normale à la paume de main. Les rotations j s'étendent sur une gamme de -40 à $+40$ degrés avec un pas de 2° , centrées sur l'attitude réelle observée.

La Figure 4-5 expose l'effet du changement d'attitude de main réelle sur la marge de pivot en conservant le même point de contact sur la sphère, pour un sujet type. On constate que le maximum de marge se trouve, quelle que soit la tâche, aux environs proche de 0, c'est-à-dire proche de l'attitude de main observée expérimentalement. D'autre part, nous pouvons remarquer une gamme d'attitudes de main décroissante avec l'amplitude de la tâche, traduisant à nouveau un espace de postures possibles plus restreint quand l'amplitude augmente.

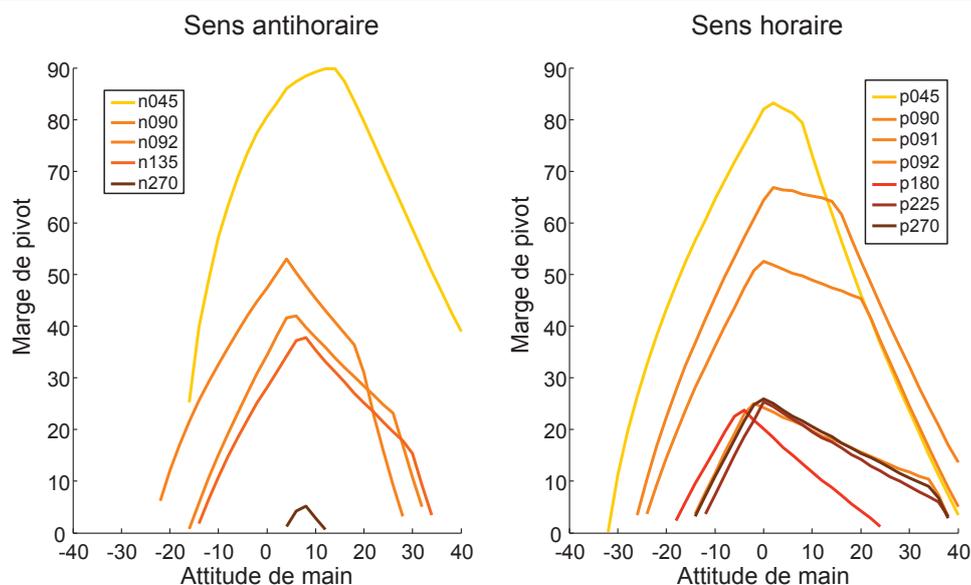


Figure 4-5. Effet de l'attitude de main sur la marge totale de pivot. Résultats de la simulation pour l'ensemble des essais pour un sujet type. La position 0 de l'attitude de main représente l'attitude réelle observée lors des expérimentations.

Afin de regarder plus généralement quelle attitude de main, dans la gamme possible, offre une marge maximale, l'ensemble de ces optimums et leur attitude de main associée ont été relevés. Le Tableau 4-1 représente les valeurs moyennes de l'attitude de main offrant le maximum de marge de pivot sans modifier le point de la saisie (point de contact entre la main et la sphère). On constate que pour les tâches dans le sens antihoraire, le maximum de marge se trouve en moyenne aux alentours proches de 0, ce qui traduit que la posture réelle adoptée par les sujets est proche de l'attitude de main optimale en terme de marge de pivot. Un comportement similaire est observable pour les tâches dans le sens horaire. Bien que les attitudes optimales soient plus éloignées de la posture réelle, les valeurs relevées d'attitude de main offrant une marge maximale restent proches de la position réelle observée.

Tableau 4-1. Attitudes de main offrant une marge de pivot maximale. Les valeurs présentées sont sous la forme Moyenne (écart type), avec pour référence 0, représentant l'attitude de main réellement observée durant les expérimentations.

Tâche	Plage d'attitude de main		Totale	Attitude (M_{max})
	min	max		
-315	-17,0 (15,1)	27,5 (11,8)	44,5 (4,4)	-0,5 (11,8)
-270	-18,4 (16,5)	31,6 (12,0)	50,0 (21,4)	10,0 (13,6)
-225	-18,7 (18,1)	24,3 (11,9)	43,0 (22,4)	4,0 (12,8)
-180	-23,3 (13,5)	29,1 (8,6)	52,4 (16,1)	-3,3 (13,2)
-135	-26,4 (8,2)	28,4 (8,3)	54,8 (5,3)	-0,6 (11,9)
-90	-26,6 (9,7)	33,1 (6,2)	59,7 (11,7)	-2,1 (12,6)
-45	-22,7 (13,8)	36,2 (4,7)	58,8 (11,7)	2,0 (14,4)
45	-24,0 (12,0)	36,8 (5,0)	60,8 (9,4)	7,7 (15,4)
90	-27,7 (9,1)	36,1 (6,5)	63,8 (7,3)	4,8 (14,8)
135	-26,3 (13,6)	35,7 (6,4)	62,0 (11,5)	9,1 (17,5)
180	-17,3 (12,9)	35,3 (8,4)	52,7 (9,9)	14,2 (19,7)
225	-23,0 (13,5)	27,7 (14,1)	50,7 (19,2)	-0,3 (9,8)
270	-11,0 (21,5)	25,3 (16,9)	36,3 (18,3)	7,0 (20,9)
315	-16,0 (8,0)	8,7 (10,1)	24,7 (15,1)	-5,3 (7,0)

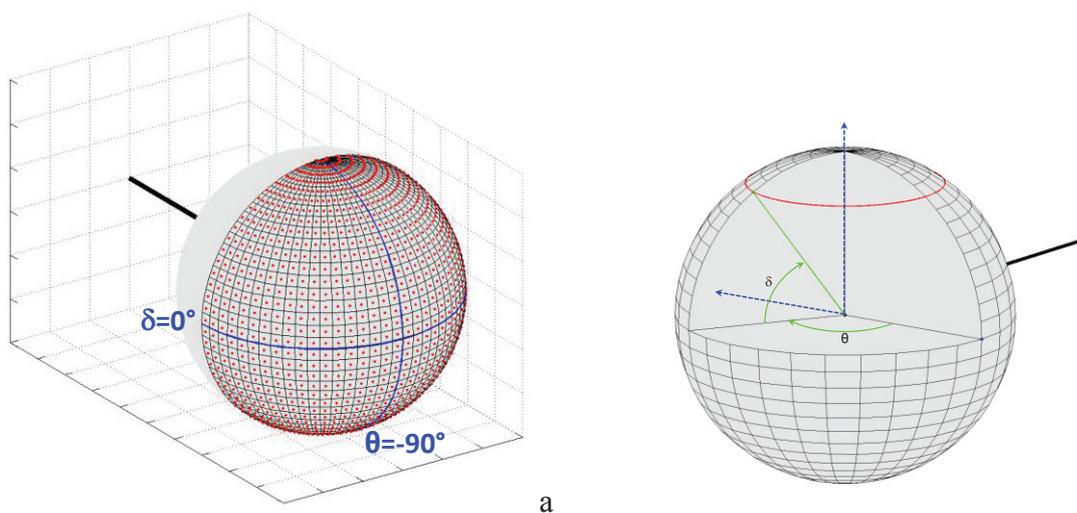


Figure 4-6. a. Zones de saisie explorées au cours de la simulation des capacités de mouvement. La latitude $\delta=0^\circ$ ainsi que la longitude $\theta=-90^\circ$ sont représentées en bleu. b. Représentation des axes de rotation définissant la latitude et la longitude.

4.2.1.3. Marges de pivot en début de rotation en fonction de la position de saisie

Afin d'explorer l'effet de la zone de saisie sur les capacités de mouvement, la demi-sphère face au sujet est divisée en surfaces de 5° en latitude (δ) par 5° en longitude (θ), soit un total de 1296 zones. Le choix de la demi-sphère s'explique par l'observation expérimentale qui n'a montré que peu de points appartenant à la seconde moitié de la sphère. Afin de simplifier la zone à un point unique, nous avons défini chaque point i comme étant le milieu de la zone considérée. L'ensemble de ces points est représenté Figure 4-6.

Pour chacun de ces points, une attitude de main référence est définie. Cette dernière est calculée de manière à orienter l'axe longitudinal de la main en fonction du côté où se trouve la zone. Ainsi, pour les zones où $\theta \leq -90^\circ$, l'axe longitudinal de la main est orienté vers la gauche et lorsque $\theta > -90^\circ$, l'axe longitudinal de la main est orienté vers la droite. Pour ce faire, à chaque zone i donnée, l'axe \vec{Z} de la main (normal à la paume) est défini comme étant parallèle et dans le même sens que le vecteur reliant le point milieu de zone au centre de la sphère. Afin de déterminer l'axe longitudinal de la main, un vecteur \vec{y} reliant le point i au pôle nord de la sphère ($\delta=90^\circ$) est défini. Dès lors, l'axe longitudinal \vec{X} de la main est calculé comme suit :

$$\begin{cases} \theta \leq -90^\circ, \vec{X} = \vec{y} \times \vec{Z} \\ \theta > -90^\circ, \vec{X} = \vec{Z} \times \vec{y} \end{cases}$$

Enfin, l'axe \vec{Y} de la main est défini comme le produit vectoriel de \vec{Z} par \vec{X} . Afin d'obtenir un repère orthonormé. L'ensemble de ces axes est représenté Figure 4-7.

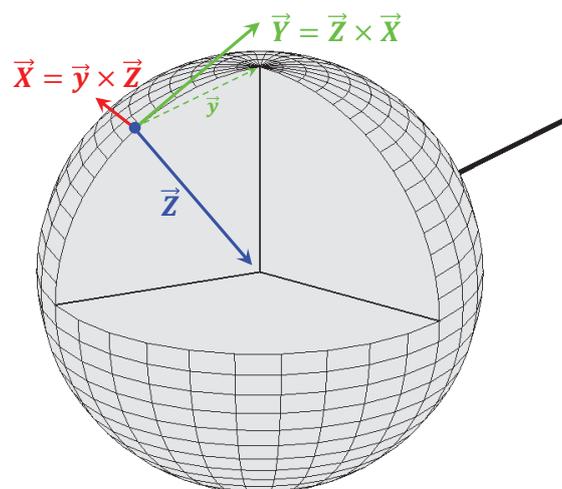


Figure 4-7. Représentation du calcul de l'attitude de main référence

Une fois l'attitude de main référence calculée, un ensemble de 61 attitudes de main sont calculées pour une zone donnée ($j = [-150,150]$ par incréments de 5° autour de \vec{Z} , avec la posture de référence en 0). Cette gamme d'attitudes nous permet de balayer l'ensemble des attitudes possibles pour chaque zone.

La Figure 4-8 représente la marge de pivot maximale pour chaque zone, parmi toutes les attitudes de main testées. On constate un net effet de la position de saisie sur la marge de pivot du coude. Les marges maximales possibles sont placées dans la partie supérieure, aux alentours du bord de la demi-sphère explorée par la simulation. Il faut remarquer ici que cette zone ne correspond pas aux points de saisie ou de fin de rotation qui présentaient des marges maximales légèrement inférieures à 100° (voir paragraphe 4.2.1.1). Or, les marges maximales simulées ici atteignent un maximum de $138,8^\circ$.

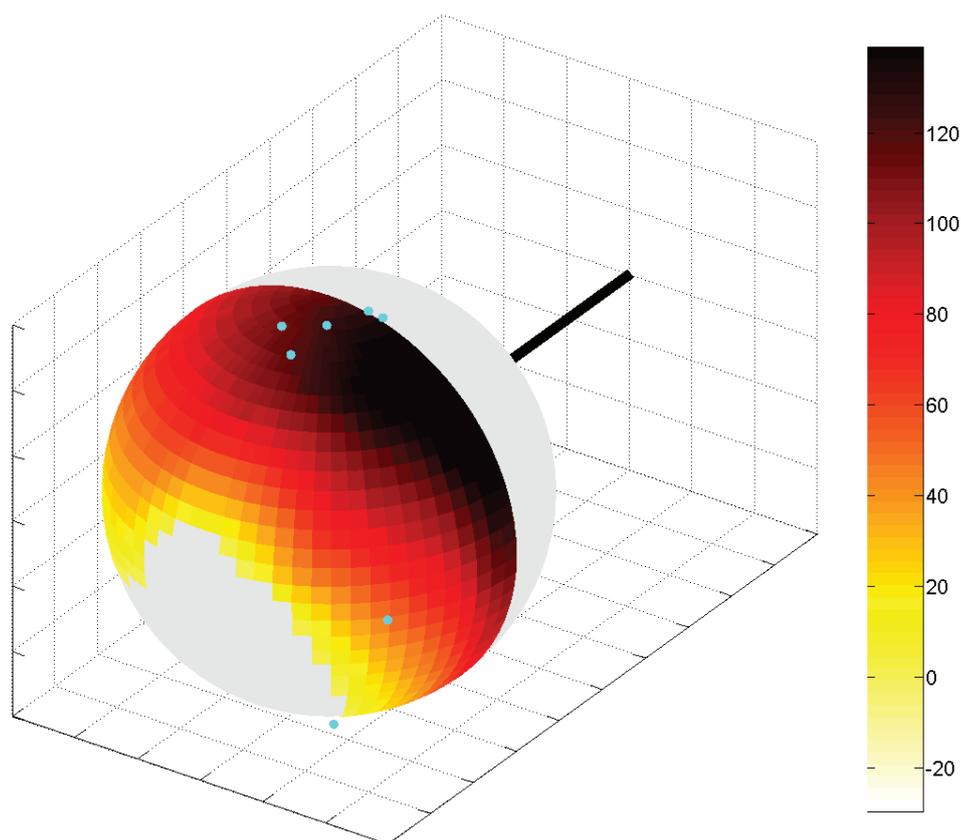


Figure 4-8. Marge de pivot en fonction de la position de saisie. Les points bleus représentent la position de saisie réelle de 7 sujets pour une saisie de l'objet sans rotation.

La Figure 4-8 représente également des positions de main pour des saisies sans rotation (points bleu). En effet, quelques essais pour des sujets donnés ont été effectués où la tâche consistait uniquement en une atteinte et saisie de l'objet sans avoir à tourner la sphère dans un second temps. Nous pouvons constater que pour 5 sujets sur 7, la saisie de la sphère sans avoir à la tourner se fait dans une zone permettant une grande marge de pivot bien que non optimale.

4.2.2. Amplitude de rotation maximale de l'objet

4.2.2.1. Effet de l'angle de pivot initial

A partir des postures réelles de saisie exposées dans le 3, il nous est possible de modifier l'angle de pivot k tout en conservant le point de saisie i et l'attitude de main j afin de voir si l'angle de pivot initial a un effet sur la capacité maximale de rotation. Cela devrait nous permettre une meilleure compréhension du choix des sujets de leur posture initiale réelle. Pour ce faire, à partir de la posture réelle, l'angle de pivot en début de rotation (PIV_d) est modifié de la manière suivante :

$$k = Inf:5:PIV_d:5:Sup,$$

avec $\begin{cases} Inf: & \text{Limite inférieure de PIV} \\ Sup: & \text{Limite supérieure de PIV} \end{cases}$

La plage de variation de k est ensuite centrée en PIV_d .

La Figure 4-9 représente les capacités maximales de rotation possibles suite à une modification de l'angle de pivot initial, pour chaque situation expérimentale enregistrée d'un sujet type. Nous pouvons constater une absence d'effet de l'angle de pivot initial pour ce sujet, quelle que soit la tâche.

De manière plus globale, le Tableau 4-2 représente l'effet moyen de l'angle de pivot initial sur la capacité maximale de rotation en fonction de la tâche. Il en ressort une très faible variabilité de la capacité maximale sur la plage de variation de PIV, traduisant une absence d'effet de l'angle de pivot initial sur la capacité maximale de rotation de l'objet, quels que soient l'individu et la tâche demandée. Nous pouvons donc avancer que le choix de la position

du coude à l'état initial ne doit pas être associé à un critère de maximisation de capacité de rotation de l'objet en ce qui concerne notre futur algorithme de simulation.

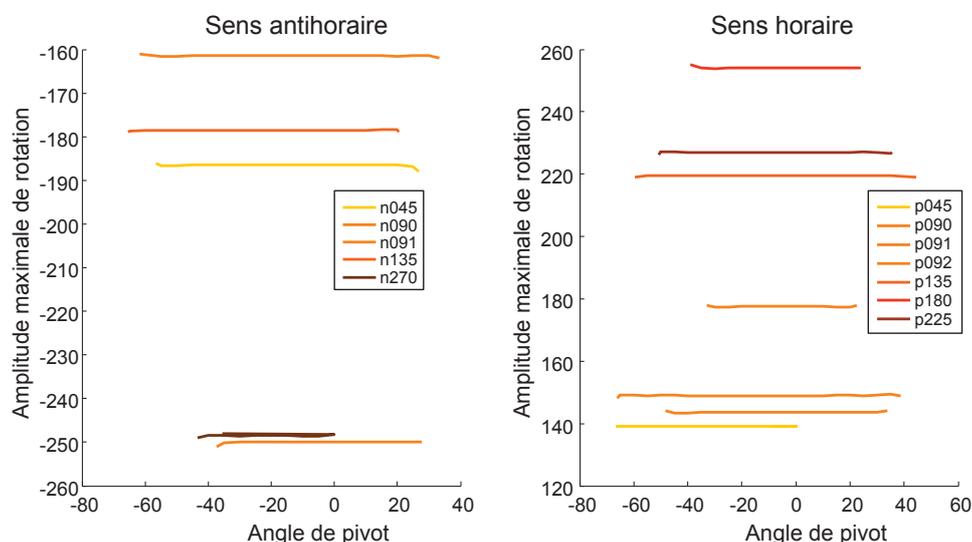


Figure 4-9. Amplitudes maximales de rotation de l'objet en fonction de l'angle de pivot initial pour un sujet type.

Tableau 4-2. Capacité maximale de rotation de l'objet en fonction de l'angle initial de pivot. Les plages de variation de pivot sont exprimées relativement à PIV_{it} . « Δ capacité simulée » représente l'écart maximal des capacités simulées pour une situation donnée tandis que « σ capacité simulée » représente l'écart type de l'ensemble des capacités maximales simulées pour une plage de variation de PIV. L'ensemble des résultats est présenté sous la forme « Moyenne (écart type) ».

Tâche	Plage variation pivot			Capacité max simulée		Δ capacité simulée	σ capacité simulée
	M-	M+	M	min	max		
-315	-12,7 (1,5)	21,9 (17,3)	34,6 (15,8)	-257,5 (21,9)	-256,0 (22,6)	1,5 (0,7)	0,7 (0,4)
-270	-26,8 (22,7)	0,7 (21,4)	27,5 (13,6)	-223,8 (59,8)	-213,2 (80,0)	1,0 (0,0)	0,5 (0,0)
-225	-21,9 (22,9)	13,1 (16,6)	34,9 (17,8)	-222,0 (60,6)	-220,6 (60,6)	1,4 (0,5)	0,7 (0,3)
-180	-18,1 (17,5)	23,3 (13,1)	41,4 (28,3)	-245,4 (39,3)	-243,9 (39,1)	1,6 (0,5)	0,7 (0,2)
-135	-33,2 (21,1)	31,2 (9,7)	64,4 (17,6)	-207,8 (39,4)	-206,5 (39,5)	1,3 (0,7)	0,6 (0,4)
-90	-37,8 (17,9)	32,4 (12,8)	70,2 (26,4)	-181,0 (53,4)	-179,6 (53,3)	1,4 (0,5)	0,6 (0,3)
-45	-44,2 (13,9)	33,1 (14,5)	77,3 (22,6)	-151,6 (42,8)	-150,5 (42,8)	1,2 (0,4)	0,5 (0,2)
45	-50,5 (15,5)	11,1 (12,8)	61,6 (17,5)	150,3 (29,8)	151,6 (29,8)	1,3 (0,7)	0,6 (0,3)
90	-45,4 (16,7)	20,1 (13,2)	65,5 (23,9)	153,2 (39,1)	157,0 (37,7)	3,8 (9,7)	1,6 (3,8)
135	-37,4 (19,0)	21,5 (16,4)	58,9 (32,6)	184,6 (42,4)	191,6 (42,4)	7,0 (15,4)	3,1 (7,0)
180	-25,5 (18,2)	15,7 (12,9)	41,2 (21,7)	218,4 (52,4)	219,4 (52,4)	1,0 (0,0)	0,5 (0,1)
225	-22,6 (21,3)	19,1 (10,2)	41,7 (27,5)	217,8 (58,8)	219,0 (59,3)	1,2 (0,8)	0,6 (0,4)
270	-10,9 (21,9)	12,8 (4,6)	23,8 (24,7)	225,0 (62,9)	226,0 (62,9)	1,0 (0,0)	0,5 (0,1)
315	-6,2 (9,1)	9,0 (1,4)	15,2 (7,6)	251,5 (85,6)	252,5 (87,0)	1,0 (1,4)	0,5 (0,7)

Il faut noter ici que quelques essais (4) ont dû être retirés de ces résultats étant données des instabilités algorithmiques sur certains cas particuliers de détection des limites articulaires (au niveau du cône du poignet en particulier). En effet, pour ces postures particulières, il est arrivé que l'algorithme ne ressorte qu'une valeur nulle pour la capacité de rotation tandis que la posture suivante testée, différente seulement de 5° par le pivot, montrait des valeurs dans un ordre de grandeur supérieur ou égale à la tâche considérée. Ces quelques cas engendraient alors des écart-types faussement élevés. Cela ne représentant que moins de 3% des données exposées, nous pouvons tout de même considérer notre algorithme de détection comme assez efficient pour nous appuyer sur les observations effectuées.

4.2.2.2. Effet de l'attitude de main

De la même façon que pour l'angle de pivot initial, il est possible de modifier l'attitude de main des postures initiales réelles afin d'explorer l'effet de cette dernière sur la capacité maximale de rotation. Les paramètres appliqués sont les mêmes que pour la simulation des marges de pivot de la partie 4.2.1.2 de ce chapitre. Les capacités maximales de rotation, en fonction de l'attitude de main sont représentées Figure 4-10. Nous pouvons constater à l'inverse du pivot initial que l'attitude de main semble avoir un effet sur la capacité maximale de rotation. La Figure 4-10 étant un exemple pour un sujet donné, nous nous proposons de regarder plus globalement l'effet de l'attitude de main sur la capacité de rotation.

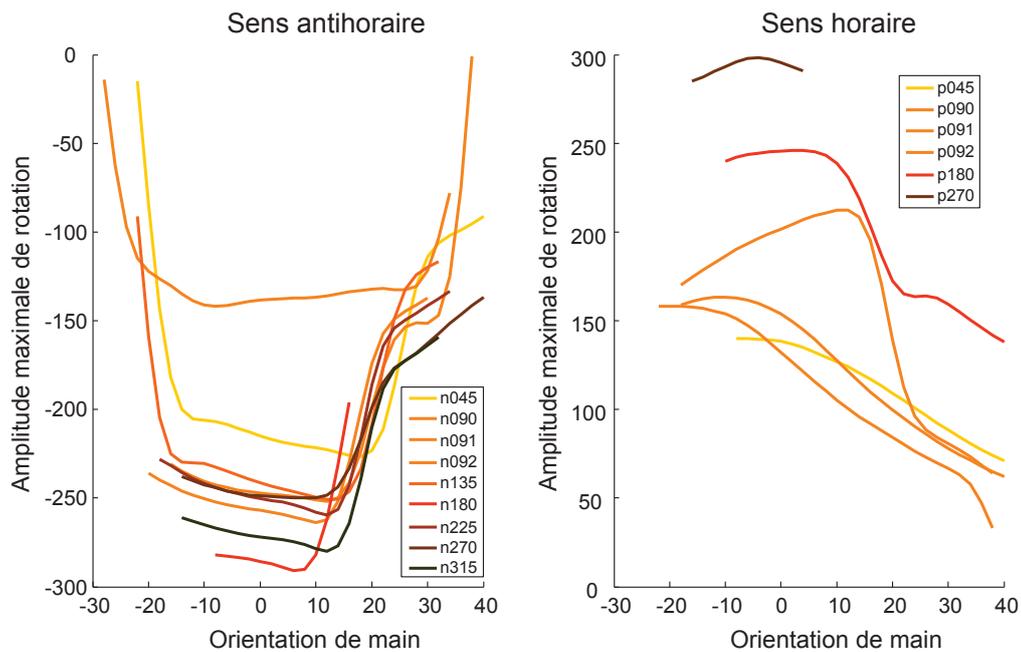


Figure 4-10. Amplitudes maximales de rotation en fonction de l'attitude de main pour un sujet type.

Le Tableau 4-3 représente l'effet de l'attitude de main sur la capacité maximale de rotation, tous sujets confondus. Nous pouvons constater dans un premier temps que la capacité maximale permise par l'attitude de main réelle de sujet (« $A(0)$ »), est toujours supérieure à l'amplitude demandée par la tâche de -180° à $+180^\circ$. Pour les amplitudes supérieures à 180° , l'analyse des résultats devient plus délicate étant donné que l'algorithme fixe numériquement la position de l'épaule et engendre ainsi des valeurs maximales simulées inférieures à la tâche demandée. Cependant, les sujets ont malgré tout réalisé ces tâches, traduisant une implication éventuelle des degrés de liberté du thorax, de la clavicule ou encore des doigts. D'autre part, il faut rappeler ici que des limites articulaires entièrement personnalisées pourraient engendrer une différence dans les résultats.

D'autre part, nous pouvons remarquer que l'attitude de main offrant la capacité de rotation maximale (« Attitude(A_{\max}) ») s'étend dans une gamme allant de -20° à $+15^\circ$ par rapport à l'attitude observée expérimentalement, sur l'ensemble des situations considérées. Il semblerait donc que l'attitude de main adoptée par les sujets soit choisie de manière à autoriser une rotation maximale proche de son maximum pour un point de saisie et une élévation du coude donnés. Il faut cependant noter ici que les plages d'attitudes testées allaient en moyenne de $-23,7^\circ$ à $29,2^\circ$ par rapport à l'attitude réelle, rendant l'observation moins notable de façon relative.

Tableau 4-3. Capacité maximale de rotation en fonction de l'attitude de main. Les plages de variation de l'attitude de main sont exprimées relativement à l'attitude de main expérimentale enregistrée. Le tableau présente pour chaque tâche, les capacités maximales et minimales pour la plage de variation considérée ainsi que la capacité maximale autorisée par l'attitude de main réelle ($A(0)$) et l'attitude de main permettant la plus grande capacité maximale (Attitude (A_{max})). L'ensemble des résultats est présenté sous la forme « Moyenne (écart type) ».

Tâche	Plage d'attitude de main			Capacité max simulée		A(0)	Attitude (A_{max})
	min	max	Totale	min	max		
-315	-23,3 (10,1)	23,3 (10,3)	46,7 (1,2)	-264,7 (15,5)	-96,3 (66,3)	-224,3 (57,1)	-2,0 (12,0)
-270	-24,9 (12,0)	32,9 (10,7)	57,7 (14,8)	-256,6 (22,6)	-66,6 (58,3)	-201,6 (79,1)	-5,7 (19,7)
-225	-24,0 (14,1)	24,0 (13,3)	48,0 (21,0)	-269,2 (10,8)	-126,2 (97,4)	-221,0 (60,9)	3,2 (7,8)
-180	-23,1 (13,4)	28,9 (8,9)	52,0 (16,6)	-258,6 (25,2)	-104,2 (50,1)	-239,4 (42,6)	13,3 (11,0)
-135	-26,4 (8,2)	28,4 (8,3)	54,8 (5,3)	-242,6 (21,4)	-84,3 (34,8)	-207,1 (39,9)	15,2 (10,8)
-90	-26,4 (9,8)	33,0 (6,2)	59,5 (12,0)	-213,4 (58,2)	-68,2 (44,8)	-180,1 (53,2)	14,7 (17,3)
-45	-24,9 (12,0)	35,8 (4,8)	60,7 (10,1)	-182,3 (52,9)	-61,9 (25,8)	-150,9 (42,8)	14,4 (15,9)
45	-23,8 (11,9)	36,0 (5,3)	60,5 (9,2)	74,6 (34,4)	180,1 (35,7)	151,0 (29,4)	-17,5 (12,6)
90	-27,6 (9,1)	36,1 (6,5)	63,7 (7,2)	60,6 (39,3)	193,4 (27,1)	155,5 (38,0)	-21,1 (11,7)
135	-26,0 (13,4)	35,7 (6,4)	61,7 (11,2)	88,1 (43,2)	216,6 (17,1)	184,9 (42,4)	-15,4 (13,2)
180	-19,8 (11,4)	34,8 (8,7)	54,5 (8,8)	108,9 (44,5)	233,3 (38,4)	218,8 (52,4)	-5,8 (14,9)
225	-23,0 (13,5)	27,7 (14,1)	50,7 (19,2)	132,2 (59,0)	247,2 (23,1)	218,5 (59,2)	-12,3 (17,3)
270	-22,5 (10,9)	18,0 (16,1)	40,5 (19,8)	179,5 (77,9)	265,5 (40,5)	225,8 (63,0)	-13,5 (11,5)
315	-16,0 (11,3)	14,0 (5,7)	30,0 (17,0)	176,0 (35,4)	289,0 (43,8)	251,5 (85,6)	-14,0 (14,1)

4.2.2.3. Effet de la position de saisie

Les données expérimentales n'offrant que quelques points de saisie à étudier, nous proposerons ici d'élargir la capacité de rotation à l'ensemble des points de contact présent sur la demi-sphère face au sujet. Pour ce faire, 1296 points de contact ($i = 1:1296$) et 61 attitudes de main ($j = -150:5:150$) sont définis de la même façon que dans la partie 4.2.1.3. Bien que l'attitude de main ne semble pas avoir d'effet sur la capacité maximale de rotation, nous chercherons néanmoins à balayer l'ensemble des attitudes de main possibles, ne pouvant connaître *a priori* la plage des possibles pour chaque point de contact. Enfin, pour chaque couple (i, j), l'angle de pivot k est fixé au milieu de la marge de pivot.

Les résultats des simulations d'amplitudes maximales dans les deux sens sont représentés Figure 4-11. Nous pouvons constater dans un premier temps un net effet de la zone de saisie sur l'amplitude maximale de rotation.

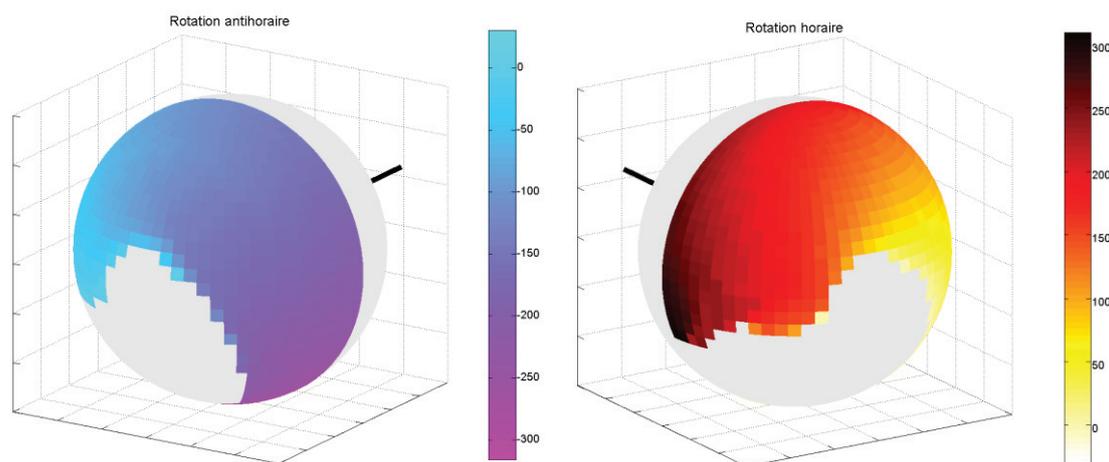


Figure 4-11. Amplitude maximale de rotation simulée dans les sens antihoraire (à gauche) et horaire (à droite). Les résultats sont présentés en fonction de la zone de saisie, et pour l'attitude de main présentant le maximum parmi la gamme d'attitudes possibles.

D'autre part, il faut noter que bien que la tendance des données expérimentales aille vers les maxima simulés lorsque l'amplitude de la tâche augmente, il ne semble pas que les participants cherchent à maximiser leur capacité de rotation pour saisir l'objet. Cependant, la tendance va vers un point de saisie permettant une rotation plus importante que celle imposée par la consigne. Les sujets sembleraient donc anticiper plus que nécessaire, les forçant à dégrader leur posture initiale, en se rapprochant plus que nécessaire des limites articulaires. Ce phénomène semblerait donc supporter l'hypothèse de confort final.

Il faut également noter ici que les valeurs de rotations maximales obtenues par simulation ne dépassent pas 310° dans le sens horaire et 315° dans le sens antihoraire. Nous pouvons expliquer cela par l'aspect numérique du calcul qui fixe la position de l'épaule et n'autorise donc pas le moindre mouvement des doigts qui contribuent certainement à la rotation de l'objet. D'autre part, bien que les limites articulaires de pronosupination soient personnalisées, un travail similaire serait nécessaire en ce qui concerne les cônes de circumduction de l'épaule et du poignet.

4.3. Discussion

Les travaux de simulation présentés dans ce chapitre avaient pour but de nous aider à comprendre le choix des sujets dans leur posture de saisie pour effectuer une rotation de sphère allant de -315° à $+315^\circ$.

Une conséquence de l'hypothèse de confort final est que le niveau de confort final serait supérieur à celui de l'état intermédiaire, soit dans notre cas le début de la rotation. Si l'on accepte l'idée générale que plus un degré de liberté est éloigné de sa limite, plus le niveau d'inconfort est faible (voir les fonctions en « U » d'inconfort (Cruse et al., 1990 ; Kee and Karwowski, 2001 ; Kee and Karwowski, 2003), nous pouvons alors nous attendre à ce que la posture soit plus éloignée des butées articulaires en fin de rotation qu'au début de rotation. En effet, nos résultats montrent une marge de pivot globalement supérieure en fin de rotation, montrant une préférence des sujets à rester plus éloignés de leurs limites articulaires en fin de mouvement. Cela implique que la posture de saisie est choisie de manière à pouvoir réaliser la tâche, tout en conservant une réserve de mobilité pour la fin du mouvement.

D'autre part, l'analyse des marges de pivot dans les deux sens (M^+ et M^-) nous a également permis de constater une tendance des sujets à conserver une marge de pivot plus importante dans le sens antihoraire, en particulier pour les faibles amplitudes (-135° à $+90^\circ$). Cela pourrait traduire une tendance à éviter de lever le coude lorsque cela est possible. Dès lors, il semblerait que les mouvements observés ne soient pas uniquement contrôlés afin d'atteindre un état final confortable, mais que le confort initial soit également pris en compte en limitant l'élévation du coude. Cette dernière observation serait soutenue par le principe de travail minimum (Soechting et al., 1995). Mais si le travail minimum entre en jeu dans le contrôle de la posture de saisie, nous pouvons nous interroger sur la cause de l'élévation du coude observée en conditions expérimentales, alors qu'il serait possible pour les sujets de conserver une position plus basse. Nous pouvons peut-être expliquer cela comme étant une conséquence de l'attitude de la main et des limites articulaires. En effet, l'élévation du coude permettrait de « libérer » le poignet en le mettant dans une position plus éloignée de ses limites articulaires, lorsque cela est possible.

Bien que l'analyse des données expérimentales nous offre déjà une meilleure compréhension des choix des sujets, nous sommes allés au-delà des postures observées en

nous demandant ce qu'auraient pu être les autres possibilités de saisie et pourquoi les sujets ont choisi une posture plutôt qu'une autre. Pour ce faire, à partir des postures réelles observées, nous avons modifié, l'un après l'autre, l'angle de pivot initial et l'orientation de main, en conservant le même point de saisie. Nous avons pu ainsi constater que le choix de l'angle de pivot initial ne semble pas affecter les capacités maximales de rotation. Dès lors, cela semble dire que nous pourrions envisager un algorithme de simulation qui proposerait un angle initial de pivot quelconque sans que cela n'altère la capacité du sujet à atteindre une cible voulue. Bien sûr cela serait dans le cas où nous ne prendrions pas en compte le principe de travail minimum évoqué précédemment.

A l'inverse, le changement d'orientation de la main semble avoir un effet marqué sur la capacité maximale de rotation. Cependant, le choix des sujets ne montre aucune tendance à maximiser cette capacité. En effet, bien que les attitudes de saisies adoptées par les sujets soient proches des attitudes autorisant une rotation maximale, la faible plage de mouvement autorisée par le poignet rend la conclusion délicate. Dès lors, nous ne pourrions pas non plus envisager ce critère comme un paramètre probant pour proposer un algorithme de choix de posture de saisie en fonction de l'amplitude de rotation.

L'analyse de l'effet de l'attitude de main semble cependant montrer une piste intéressante pour la simulation. En effet, nous avons pu constater que les sujets saisissent l'objet en orientant la main de manière à maximiser la marge de pivot autorisée par l'attitude de main choisie et la position de l'épaule. Dès lors, pour un point de contact choisi, l'outil de simulation envisagé dans le 5, devra prendre en compte la maximisation de la marge de pivot à la saisie comme critère d'optimisation.

Une question majeure reste alors posée : comment le point de saisie est-il choisi ? Bien sûr, le point de saisie doit permettre au sujet de réaliser la tâche demandée. Les simulations effectuées nous ont montré qu'en cas de saisie sans rotation à venir, les sujets ont tendance (en majorité) à choisir un point de saisie offrant une marge de pivot maximale. Pour le reste des sujets, il se pourrait que le choix soit fait en sorte de ne pas élever le coude. Cependant, la marge de pivot en début de rotation ne peut être considérée en premier lieu pour le choix de la saisie lorsqu'une tâche de rotation suit la saisie. Elle devra cependant être prise en compte une fois le point de contact choisi.

Les différentes observations de ce chapitre nous ont finalement permis d'arriver aux conclusions suivantes :

- _ Le point de contact avec l'objet n'est pas choisi de manière à maximiser la marge de pivot en début ou en fin de rotation, ni la capacité de rotation maximale.
- _ Pour un point de contact donné, l'orientation de la main tend à maximiser la marge de pivot.
- _ Pour un point de contact et une orientation de main donnés, le coude semble suivre le principe de confort final mais également de confort initial selon le principe de fonction en U d'inconfort.

A partir de tout cela, nous pouvons imaginer que le choix du point de contact à la saisie serait une réponse prenant en compte l'ensemble des contraintes suivantes à savoir :

- _ permettre une rotation supérieure ou égale à la tâche,
- _ laisser une marge de pivot au début et à la fin du mouvement, dans la mesure du possible, donner la priorité au confort final,
- _ et maximiser la marge de pivot pour un point de contact donné.

Dès lors, à partir de ces différentes observations, nous allons pouvoir envisager un algorithme de simulation de posture de saisie et par extension du mouvement de rotation en suivant les principes exposés précédemment.

5 Vers un modèle de simulation de mouvement du bras pour une tâche de manipulation d'objet

Dans le chapitre précédent, l'espace des postures admissibles du bras par les limites articulaires en début et en fin de rotation a été exploré afin de comprendre la façon dont le mouvement de manipulation est contrôlé. Un des objectifs de cette thèse est de proposer un algorithme capable de simuler le mouvement du bras lors d'une tâche de manipulation d'un objet. Dans le passé, Wang a proposé un algorithme de cinématique inverse (IK) permettant la prise en compte de la non-linéarité des limites articulaires (couplage entre les axes de mobilité, notamment au niveau de l'épaule) et l'introduction d'une loi de coordination entre les axes de mobilité du bras par pondération (Wang, 1999a). L'application d'un tel algorithme pour simuler le mouvement complet d'atteinte et de manipulation d'un objet n'est possible que si la posture intermédiaire de saisie est connue d'avance. Il est donc nécessaire de prédire la posture de saisie dans un premier temps.

L'objectif de ce chapitre est donc de proposer une méthode de détermination de la posture de saisie et d'appliquer l'algorithme IK de Wang pour simuler le mouvement de rotation d'un objet. Le choix de la méthode de prédiction de posture de saisie est rendu possible grâce à l'observation expérimentale (3) et la compréhension par simulation du contrôle du mouvement (4).

5.1. Propositions d'algorithmes de simulation

5.1.1. Principe général de l'algorithme

5.1.1.1. Détermination de la posture de saisie

Comme évoqué précédemment dans ce manuscrit, le mouvement de manipulation d'objet est un mouvement multi séquentiel qui implique d'être en mesure de simuler chacune des séquences le constituant. L'algorithme proposé ici s'intéresse plus particulièrement à la phase de manipulation, c'est-à-dire de l'instant de saisie à la fin de la tâche. Dans notre cas, la tâche en entrée de l'algorithme, représenté Figure 5-1, correspond à une amplitude de rotation.

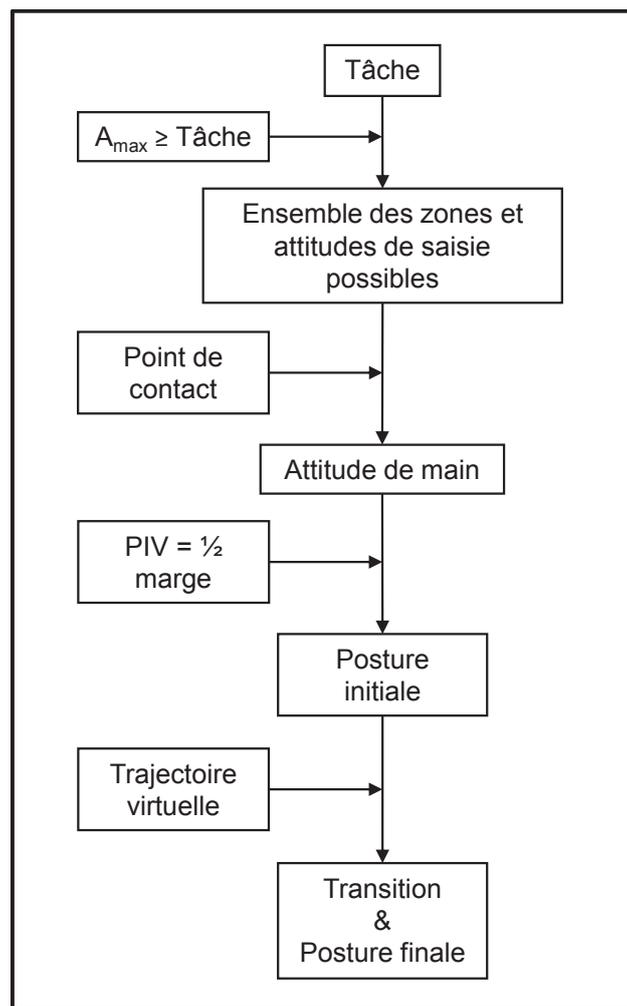


Figure 5-1. Visualisation du principe général de simulation du mouvement de manipulation

A partir de la consigne d'entrée, l'algorithme détermine l'ensemble des points de saisie et orientations de mains admissibles sur l'objet, permettant de réaliser au minimum l'amplitude de rotation demandée. Cette détermination est effectuée à partir des données issues des simulations du 4, sur les capacités maximales de rotation en fonction de la zone de saisie et de l'orientation de la main. Le choix de l'attitude de main à l'instant de saisie est pour nous le point critique dans cet algorithme. Nous détaillerons dans la partie suivante les différentes méthodes envisagées afin d'aboutir à une solution à partir de l'ensemble des points de contacts admissibles par la tâche.

Une fois l'attitude de main à la saisie déterminée, l'étape suivante consiste en un calcul de la position du coude au moment de la saisie. Les résultats du 4 ont fait apparaître que la position du coude au moment de la saisie n'aurait aucun effet sur la capacité maximale de

rotation. Dès lors, afin de simplifier la méthode dans un premier temps, nous placerons le coude au milieu de la marge de mouvement autorisée par l'attitude de main et la position d'épaule considérées. Une fois la position du coude calculée, la posture de saisie du membre supérieur est alors entièrement définie. Il ne reste qu'à simuler le mouvement de transition de la posture de saisie jusqu'à l'amplitude de rotation consigne.

5.1.1.2. Création et suivi de la trajectoire de la main

Afin d'obtenir une trajectoire de la main, nous faisons l'hypothèse que la main est attachée à l'objet (rapport à la consigne donnée aux sujets durant la partie expérimentale). Dès lors, le repère associé à l'orientation de main au début de la rotation (M_d) est multiplié par une matrice de rotation $R(\vec{n}, \theta_t)$ pour un angle de rotation θ_t allant de 0 à l'amplitude consigne et un axe de rotation \vec{n} de l'objet, passant par le centre de la sphère saisie. L'orientation de main correspondante est alors définie à chaque instant t par l'équation suivante :

$$M_t = R(\vec{n}, \theta_t) \times M_d$$

La position de la main (plus précisément du poignet) au cours de la trajectoire est quant à elle calculée à chaque instant à partir de la position initiale du poignet. La trajectoire correspond à un arc de cercle, perpendiculaire à l'axe de rotation.

Comme exposé par Wang en 1999, 4 degrés de libertés sont impliqués dans l'orientation de la main : l'angle de pivot (PIV), la prono-supination (SUP), la flexion (FLE) et l'abduction (ABD) du poignet (Wang, 1999a). Afin de passer d'une attitude de main M_t connue à un instant t à un instant $t+1$, la variation d'angle au niveau de PIV, SUP, FLE et ABD peut se faire en minimisant la fonction de coût f suivante :

$$f = k_{PIV}\dot{\theta}_{PIV}^2 + k_{SUP}\dot{\theta}_{SUP}^2 + k_{FLE}\dot{\theta}_{FLE}^2 + k_{ABD}\dot{\theta}_{ABD}^2$$

Les coefficients k_{PIV} , k_{SUP} , k_{FLE} et k_{ABD} permettent de jouer sur la participation relative de chaque degré de liberté dans la transition de l'instant t à l'instant $t+1$. Plus la valeur d'un coefficient est élevée, moins la participation du degré de liberté sera importante. D'après Wang, ces coefficients peuvent être respectivement fixés à 1,5, 1, 2 et 3.

A partir d'une posture de saisie et de la trajectoire virtuelle de la main qui en découle, il est alors possible de déterminer l'évolution de ces degrés de liberté au cours de la rotation de l'objet.

5.1.1.3. Gestion des butées articulaires

Tout au long du mouvement simulé, une vérification est effectuée afin de savoir si la posture calculée à un instant donné est comprise ou non dans les limites articulaires. Cette détection s'effectue selon le principe décrit dans la partie 4.1.1 du 4.

Dans le cas où un degré de liberté serait détecté comme dépassant une butée, une rotation de 2° est alors effectuée autour de l'axe épaule-poignet ou poignet-épaule pour réorienter le segment en butée à l'intérieur de son cône (se référer à (Wang, 1999a) pour une description plus détaillée de l'algorithme utilisé). Cependant, des ajustements sur l'algorithme d'origine ont été nécessaires afin de prendre en considération les instabilités de calcul à la proximité des limites articulaires. En effet, pour une posture étant très faiblement hors des limites articulaires (bras ou avant-bras distant de la limite de son cône de circumduction de moins de 1% de sa longueur), la détermination du sens de la correction se voyait perturbée. Afin de pallier ce problème, les postures détectées comme étant dans cet espace proche, sont alors considérées comme n'étant pas en butée.

Les limites articulaires liées aux cônes de circumduction sont issues de la littérature ((Wang, 1998) pour le poignet et (Engín and Chen, 1986) pour l'épaule, complétées par les limites de rotation axiale du bras (Wang et al., 1998)). Enfin, les limites de l'angle de pronosupination ont été personnalisées pour un sujet donné du 3, dont nous avons également pris les longueurs segmentaires pour les simulations de ce chapitre.

5.1.2. Détermination de la posture de saisie

A partir des observations issues des simulations du 4, il nous est possible de définir différentes stratégies de simulation de la posture de saisie pour une amplitude de rotation demandée. Quelle que soit la stratégie considérée, cette dernière s'applique suite à l'étape de détermination de zones de saisie admissibles en première partie de l'algorithme. A partir de cet ensemble de points, la posture de saisie peut être déterminée de différentes façons :

- _ Proposition n°1 : Ayant observé que l'hypothèse de confort final semble être vérifiée, nous chercherons le point de saisie et l'orientation de main maximisant la marge finale.

- _ Proposition n°2 : Bien que l'hypothèse de confort final ait été vérifiée, nous avons cependant mis en avant dans le 4 qu'il fallait également prendre en compte le confort initial. Cette deuxième solution cherchera donc à maximiser le compromis entre la marge de début et la marge de fin de mouvement, soit $\max (M_d + M_f)$. Cette maximisation se fait pour l'ensemble des attitudes de main répondant à l'inégalité : $M_f \geq M_d$.

- _ Proposition n°3 : Une option plus rapide en temps de calcul serait de prendre le barycentre de la zone de points de contact admissibles permettant de réaliser la tâche. En effet, nous avons mis en avant dans le 4 que les sujets avaient une tendance à maximiser la marge de pivot pour déterminer l'orientation de la main pour un point de saisie donné. Dès lors, la seconde étape consistera à déterminer l'attitude de la main maximisant la marge initiale, pour le point considéré.

- _ Proposition n°4 : La méthode repose ici sur le choix d'un point de saisie de façon aléatoire avec une loi de probabilité parmi l'ensemble des points admissibles. Par manque de temps, seule la loi uniforme discrète est testée ici. Une fois un point choisi, l'orientation de main est déterminée en maximisant la marge de mouvement à la saisie, comme pour la proposition n°3. L'algorithme ne conserve alors cette attitude de saisie que si la marge de mouvement finale est supérieure ou égale à la marge de début. Dans le cas contraire, un nouveau point de saisie est choisi aléatoirement.

5.2. Résultats

L'ensemble des résultats présentés ci-après se base sur les dimensions segmentaires d'un sujet ayant participé à la partie expérimentale (3). D'autre part, la position de la sphère par rapport à l'épaule correspond à la position expérimentale moyenne de ce même sujet. Nous pourrions constater sur l'ensemble des tâches simulées une absence de résultats pour la tâche de $+315^\circ$. En effet, les limites articulaires et les contraintes imposées à la simulation (main fixe par rapport à l'objet et absence de mouvement d'épaule) ne permettent pas de réaliser une telle amplitude de rotation.

5.2.1. Simulation de la posture de saisie

5.2.1.1. Proposition n°1 : Maximisation de la marge finale

La Figure 5-2 représente les points de saisie simulés par la proposition n°1, décrite précédemment, à savoir en maximisant la marge de mouvement finale. Nous pouvons constater que le point de saisie simulé change en fonction de l'amplitude de la tâche demandée, tout comme le montraient les données expérimentales du 3. En effet, une demande de faible amplitude engendre une saisie sur les parties plutôt supérieures de la demi-sphère, allant de plus en plus vers le côté puis le dessous pour des amplitudes plus importantes.

Cependant, les points de saisie ainsi simulés montrent une tendance à se trouver en bordure de la demi-sphère et par conséquent, éloignés de la répartition réelle observée au cours de la partie expérimentale. Ce phénomène peut s'expliquer par les simulations réalisées dans le 4. En effet, ces résultats avaient montré des marges de pivot supérieures au niveau du bord de la demi-sphère. Bien que les calculs aient été effectués à l'instant de saisie, le facteur principal ici reste la position du point considéré sur la sphère. Dès lors, les résultats apportés par cette proposition peuvent s'expliquer par ce phénomène d'éloignement des données réelles. Nous chercherons donc à voir si l'une des autres propositions initiales ne serait pas plus adaptée pour nous rapprocher des données expérimentales et ainsi être en mesure de simuler un comportement plus proche d'un comportement réel.

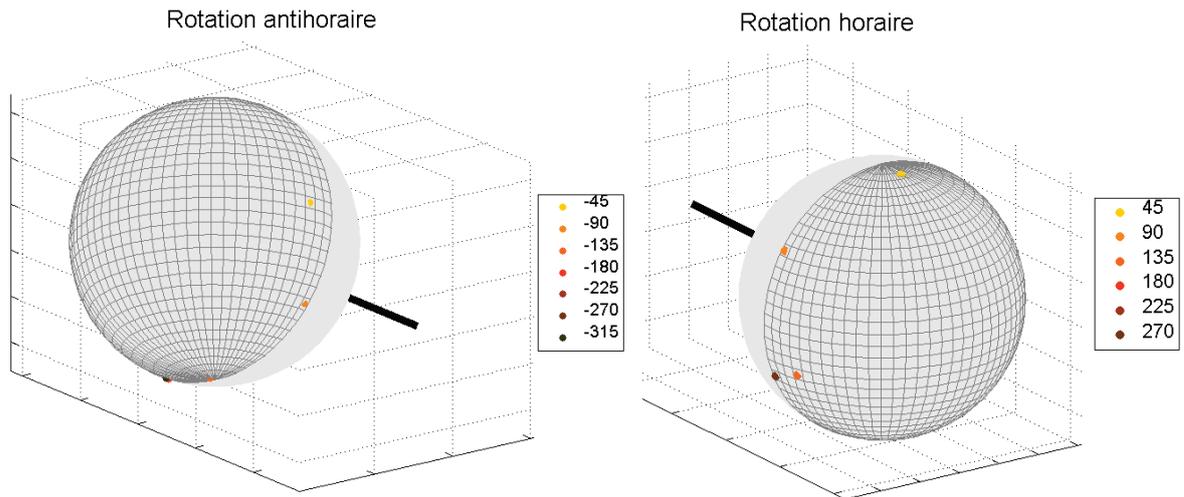


Figure 5-2. Points de saisie simulés en considérant une maximisation de la marge de mouvement finale. La demi-sphère quadrillée représente la partie face au sujet. L'axe de rotation d'arrière en avant est quant à lui représenté en noir.

5.2.1.2. Proposition n°2 : Compromis entre marge de début et marge finale

La Figure 5-3 représente les points de saisie simulés par la proposition n°2 décrite dans la partie 5.1.2. On constate, comme pour le cas précédent, que l'évolution du point de contact évolue avec l'amplitude de rotation demandée. Cependant, bien que la tendance suive les observations expérimentales (du haut vers le bas en passant par le côté), les points simulés sont à nouveau en bordure de la demi-sphère, ce qui diffère de l'emplacement réel moyen de saisie. L'utilisation seule de ce critère ne semble donc pas aboutir à des résultats satisfaisants en ce qui concerne le point de contact.

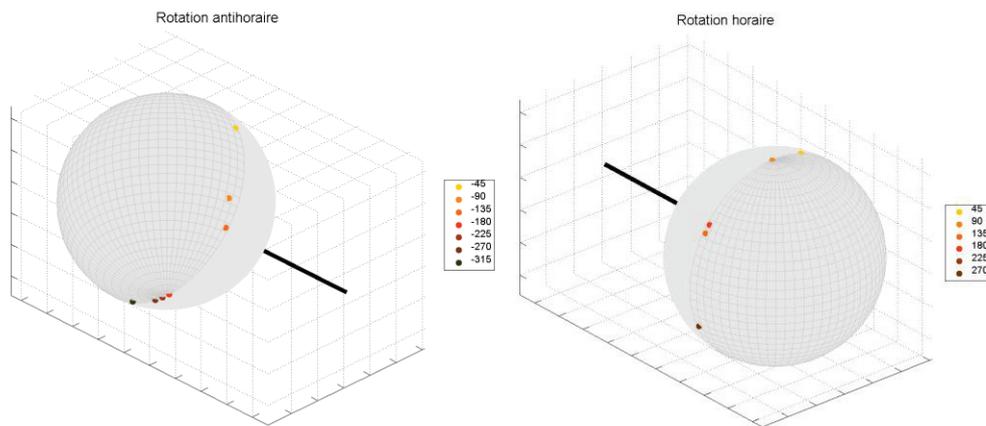


Figure 5-3. Points de saisie simulés en considérant une maximisation du compromis entre les confort initial et final. La demi-sphère quadrillée représente la partie face au sujet. L'axe de rotation d'arrière en avant est quant à lui représenté en noir.

5.2.1.3. Proposition n°3 : Saisie en milieu de zone des points de contact admissibles

La Figure 5-4 expose les points de contact simulés par la solution proposée n°3 au regard des données expérimentales moyennes (cercles pointillés). L'évolution des points de contact en fonction de l'amplitude de la tâche est dans ce cas plus proche de la situation moyenne expérimentale qu'avec les deux solutions précédentes. En effet, pour chaque amplitude simulée, on constate un point de contact dans la zone moyenne réelle, à l'exception des tâches à $+225^\circ$ et $+270^\circ$. Il semblerait donc que l'utilisation du milieu de la zone possible de saisie soit une bonne option pour la détermination du point de contact, y compris au niveau du temps de calcul. En effet, il n'est pas nécessaire dans ce cas de passer par une optimisation du niveau de confort sur l'ensemble de la zone admissible.

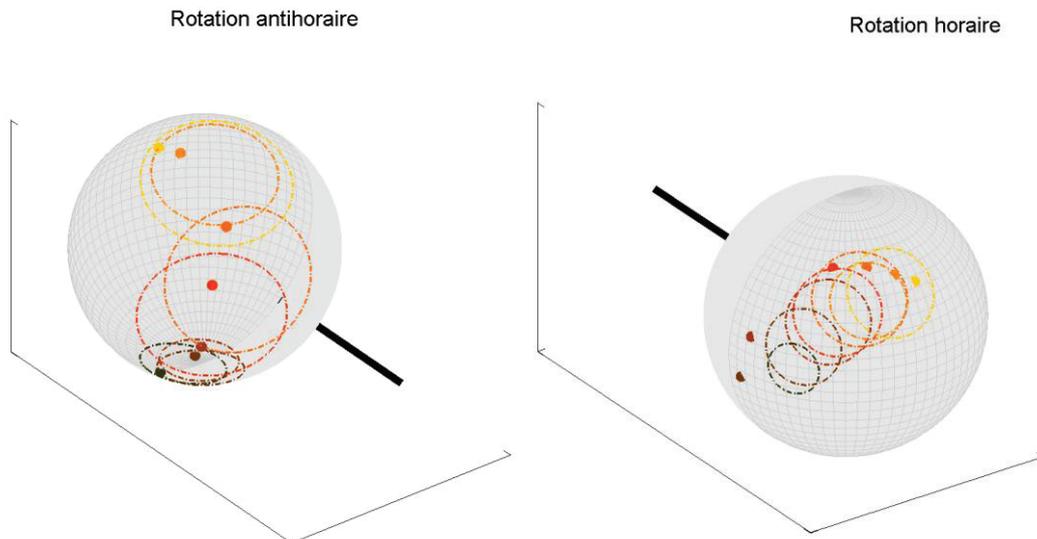


Figure 5-4. Points de saisie simulés en considérant le milieu de la zone des points de contact possibles. Les résultats des simulations (points) sont mis au regard des zones moyennes de saisie dans la partie expérimentale (cercles en pointillés). La demi-sphère quadrillée représente la partie face au sujet. L'axe de rotation d'arrière en avant est quant à lui représenté en noir.

Les points de contact simulés semblant refléter la réalité, nous nous sommes alors intéressés plus en détail aux angles articulaires de la posture simulée par cette 3^e proposition. La Figure 5-5 représente la comparaison des angles de prono-supination et de pivot réels et simulés par la proposition n°3. Ces résultats montrent que cette proposition tend à mieux refléter le comportement réel observé, à savoir :

- _ Dans le sens antihoraire, un angle de pivot proche de 0 et un ajustement rapide par SUP lorsque l'amplitude de la tâche augmente.
- _ Dans le sens horaire, un angle SUP en moyenne constant, proche de la supination maximale et un ajustement à la tâche par une élévation progressive du coude (baisse de la valeur de PIV).

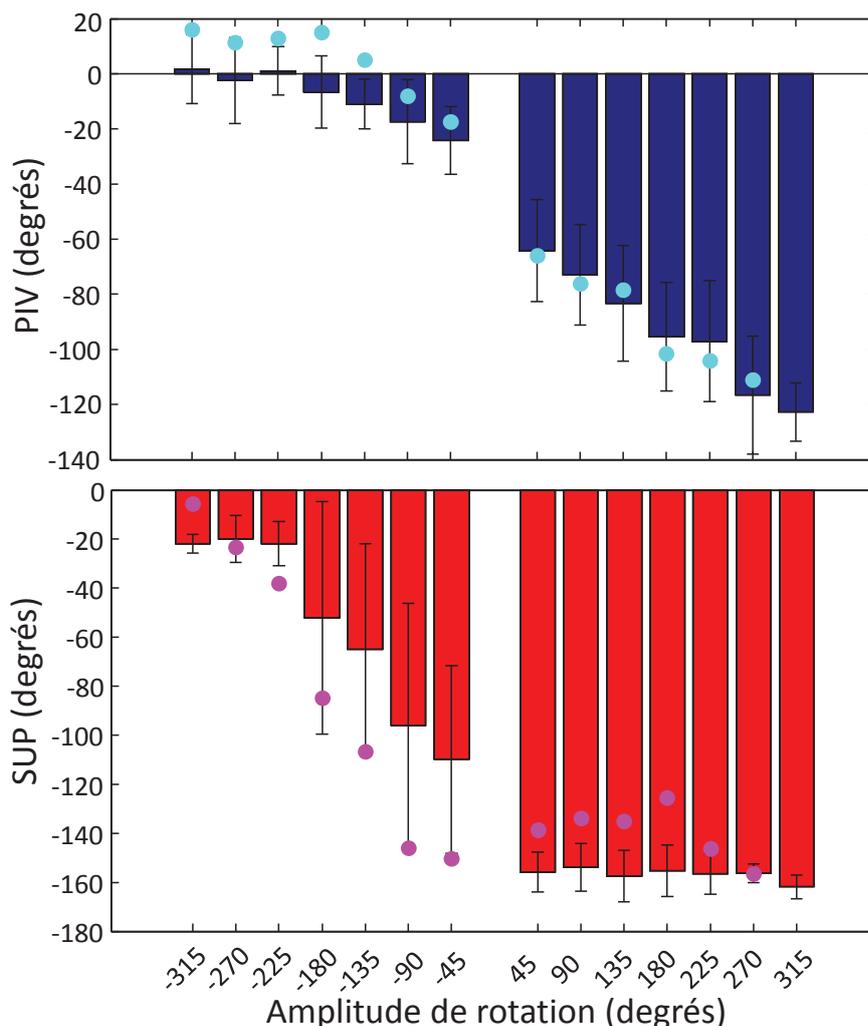


Figure 5-5. Comparaison des angles du bras réels (histogrammes) et simulés (points) en saisissant au milieu de la zone possible. Le graphique supérieur compare les valeurs de PIV(bleu) tandis que le graphique inférieur expose les données relatives à SUP (rouge). L'ensemble des données expérimentales est représenté pour chaque tâche par la moyenne, tous sujets confondus, à plus ou moins un écart type.

Enfin, bien que les postures simulées semblent se rapprocher des postures réelles, nous devons encore vérifier si le principe de confort final est respecté en utilisant cette méthode de simulation. La Figure 5-6 expose les marges de pivot de début et de fin de rotation associées aux mouvements réels et simulés en saisissant l'objet au niveau du barycentre des points admissibles. Le paramètre de confort n'étant pas pris en compte dans cette méthode, rien ne nous permettait *a priori* de savoir quels auraient pu être les effets de cette simulation sur les marges de pivot en début et fin de rotation.

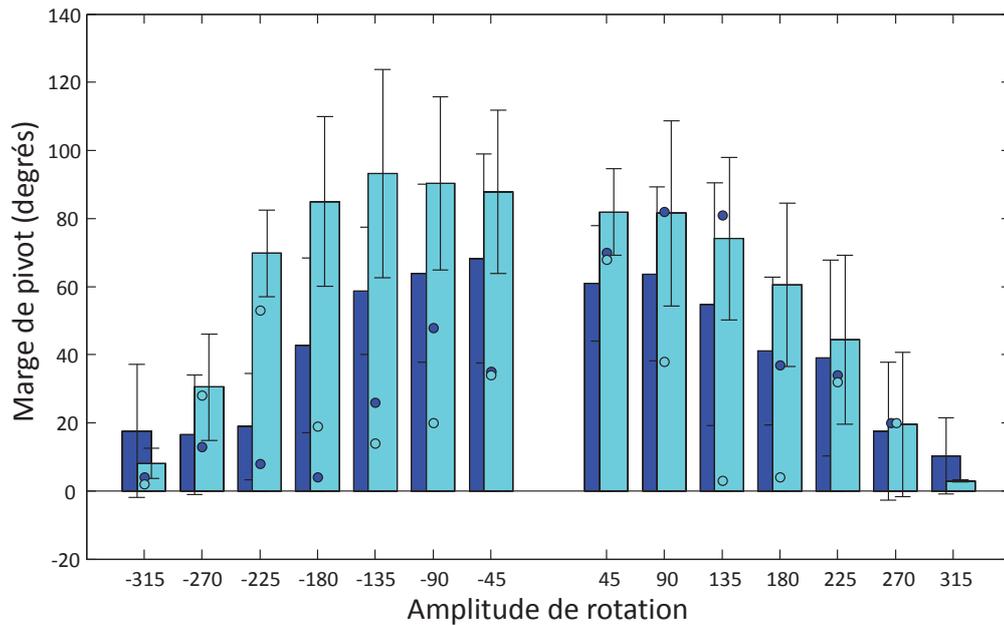


Figure 5-6. Marges de mouvement de début (bleu foncé) et fin (bleu clair) de rotation réelles (histogrammes) et simulées (points) en considérant une saisie au niveau du barycentre de la zone admissible.

Nous pouvons constater dans un premier temps que les marges de pivot finales des postures simulées semblent être inférieures aux marges de pivot au moment de la saisie, excepté pour les tâches allant de -180° à -270° . Nous ne pouvons évidemment affirmer cela qu'en nous basant sur des valeurs uniques pour chaque amplitude de rotation, mais la tendance semble cependant claire. D'autre part, la marge de pivot finale ne présente pas d'évolution en U inversé, caractéristique observée à partir de nos données expérimentales. Dès lors, si nous considérons que la marge de pivot reflète indirectement le confort associé à la posture, il semblerait donc que la théorie de l'état de confort final ne soit pas vérifiée en utilisant cette solution pour simuler la posture de saisie.

5.2.1.4. Proposition n°4 : Choix aléatoire du point de saisie

Etant donnée la variabilité des mouvements observés, notre dernière proposition vise à introduire de la variabilité sur la posture de saisie. La Figure 5-7 représente différents points de saisie possibles pour réaliser chacune des tâches simulées. Pour chaque amplitude considérée, 20 tirages ont été effectués, respectant toutes la consigne et le principe de confort final supérieur au confort initial.

On constate une évolution des zones de saisie allant vers le côté et le bas à mesure où l'amplitude de la consigne augmente. De plus, il est également intéressant de noter que, comme observé avec les données expérimentales, la variabilité des points de saisie diminue avec l'amplitude de la tâche, et ce quel que soit le sens de rotation. Ce phénomène s'explique par la quantité de points de saisie admissibles décroissante avec l'amplitude de la tâche.

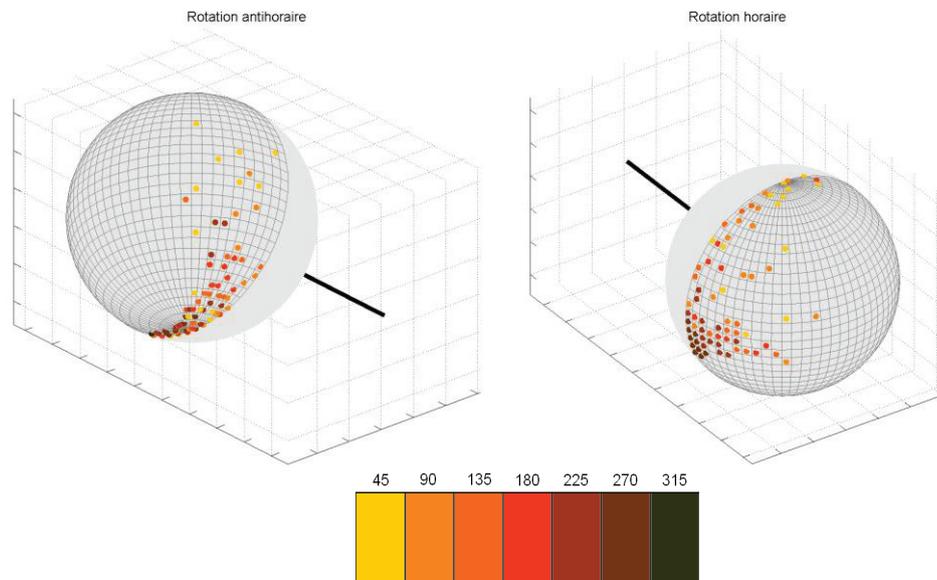


Figure 5-7. Représentation de différents points de saisie simulés en considérant la variabilité du mouvement. Un total de 20 points de saisie a été simulé pour chaque attitude

Les points de saisie simulés montrant une tendance comparable aux données expérimentales, nous nous sommes donc intéressés plus en détail au reste des paramètres caractérisant la posture du bras. Le Tableau 5-1 compare les angles PIV et SUP réels et simulés. Nous pouvons observer, comme pour les points de contact, une évolution comparable entre les angles PIV et SUP réels et simulés. Cependant, il est nécessaire de noter que pour les rotations en sens antihoraire, les angles PIV simulés ont tendance à être supérieurs aux valeurs expérimentales tous sujets confondus (c'est-à-dire avec un coude plus bas), tout comme les angles SUP simulés, c'est-à-dire avec moins de pronation que les données réelles. Cela est particulièrement observable pour les faibles amplitudes (de -45° à -180°) où les zones de saisie possible ont de plus grandes dimensions. En effet, les points de saisie expérimentaux dans le sens antihoraire présentaient particulièrement une forte variabilité. Il faut noter ici que cette comparaison réel/simulé ne nous offre que des pistes d'analyse étant donné que les simulations effectuées ici ne prennent en compte l'anthropométrie que d'un seul individu. De plus, l'ensemble des limites articulaires n'est pas ajusté aux capacités réelles du sujet. Il serait

donc intéressant de pouvoir appliquer ces simulations en personnalisant entièrement les longueurs de segments et limites articulaires.

En ce qui concerne les rotations dans le sens horaire, le comportement simulé est également comparable aux données expérimentales (Tableau 5-1), à savoir un angle SUP de saisie relativement constant (proche de la pronation maximale) quelle que soit l'amplitude et un ajustement de la posture par une élévation du coude progressive (c'est-à-dire un angle PIV diminuant).

Tableau 5-1. Comparaison des angles PIV et SUP de saisie réels et simulés en incluant de la variabilité à la posture simulée. Les données réelles représentent le comportement moyen observé pour l'ensemble des sujets tandis que les données simulées représentent le comportement moyen pour le sujet considéré dans les simulations.

Tâche	PIV		SUP	
	Réel	Simulé	Réel	Simulé
-315	4,8 (20,9)	17,5 (0,0)	-21,9 (3,8)	-7,4 (0,0)
-270	6,4 (17,8)	11,2 (3,6)	-19,9 (9,6)	-17,4 (11,3)
-225	3,7 (15,7)	8,5 (6,6)	-21,9 (9,1)	-28,8 (26,8)
-180	0,4 (17,0)	6,6 (6,4)	-52,0 (47,4)	-34,6 (22,8)
-135	-5,4 (12,4)	5,0 (7,8)	-64,9 (43,1)	-39,8 (30,1)
-90	-10,6 (17,5)	-2,5 (9,8)	-96,1 (49,9)	-39,3 (27,1)
-45	-18,0 (14,8)	-2,1 (16,1)	-109,9 (38,2)	-55,9 (41,1)
45	-59,5 (18,5)	-81,6 (20,3)	-155,8 (8,1)	-136,3 (17,3)
90	-69,9 (18,3)	-88,2 (17,9)	-153,8 (9,8)	-141,6 (15,3)
135	-76,1 (18,4)	-105,1 (14,5)	-157,4 (10,5)	-152,9 (12,8)
180	-88,7 (17,5)	-110,7 (9,1)	-155,3 (10,5)	-150,3 (26,9)
225	-98,0 (20,5)	-114,2 (5,1)	-156,6 (8,3)	-153,6 (5,6)
270	-107,9 (18,7)	-115,9 (2,9)	-156,3 (3,9)	-157,7 (2,6)
315	-117,0 (10,4)	/	-161,8 (4,9)	/

A partir de ces postures de saisie maintenant définies, nous pouvons, comme dans le cas précédent, nous intéresser aux marges de mouvement associées. Etant donné que ces dernières étaient prises en compte par l'algorithme, nous ne devrions pas observer de marges finales inférieures aux marges de début. Cependant, l'aspect général de l'évolution de ces marges en fonction de l'amplitude consigne peut être un bon indice d'estimation de la validité de notre algorithme. La Figure 5-8 représente cette évolution en fonction de la consigne. Nous pouvons constater, car imposé par l'algorithme, des marges de mouvement finales supérieures aux marges de début quelle que soit la tâche. Cependant, le phénomène le plus notable est

l'évolution en U inversé sur l'ensemble des consignes testées, tout comme pour les données expérimentales. Il semblerait donc que cette dernière solution reproduise un comportement proche plus des données expérimentales.

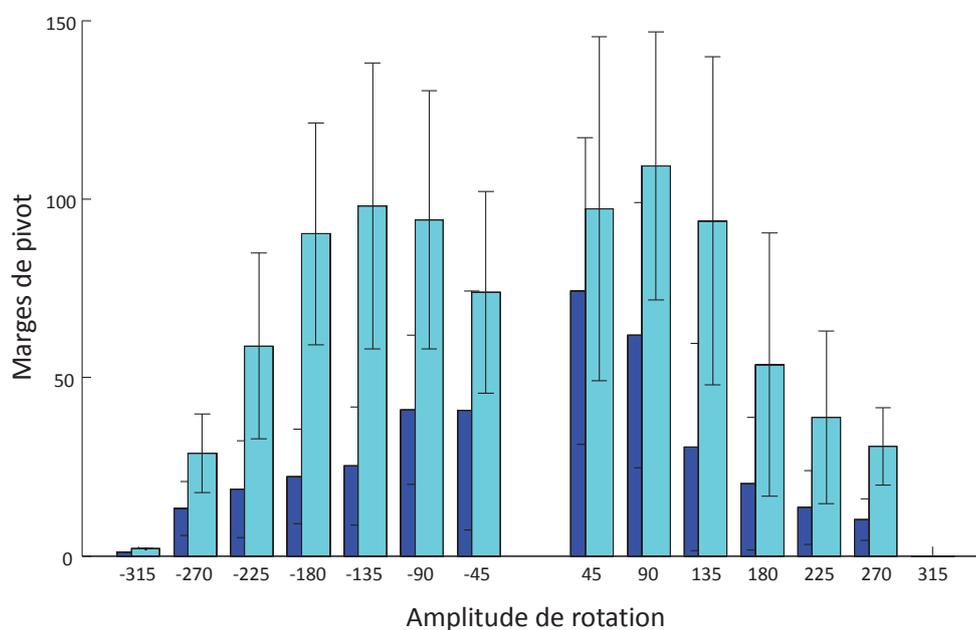


Figure 5-8. Evolution des marges de pivot des postures simulées en début (bleu foncé) et en fin de rotation (bleu clair).

Bien que le comportement général en U inversé soit retrouvé, nous nous sommes néanmoins intéressés aux valeurs des marges de pivot des postures simulées par la dernière solution. Le Tableau 5-2 expose les valeurs des marges totales de pivot au regard des données réelles. Nous pouvons constater une tendance à simuler une posture ayant une marge de mouvement plus faible que pour les situations réelles. Il semblerait donc qu'une meilleure prise en compte du confort initial soit nécessaire afin d'améliorer éventuellement notre algorithme si nous souhaitons nous rapprocher un peu plus d'un comportement proche des observations expérimentales.

Les marges de mouvement finales sont quant à elles dans des gammes très proches des données expérimentales pour la majeure partie des situations.

Tableau 5-2. Comparaison des marges de mouvement simulées en début et fin de rotation par rapport aux données expérimentales.

Tâche	M _{deb}		M _{fin}	
	Réelle	Simulée	Réelle	Simulée
-315	17,6 (19,5)	1,0 (0,0)	8,1 (4,5)	2,0 (0,0)
-270	16,0 (17,5)	13,3 (7,5)	30,5 (15,6)	28,8 (11,1)
-225	18,9 (15,6)	18,7 (13,5)	69,8 (12,7)	58,8 (26,0)
-180	42,8 (25,6)	22,3 (13,3)	85,0 (24,9)	90,3 (31,1)
-135	58,7 (18,7)	25,2 (16,5)	93,2 (30,6)	98,1 (40,0)
-90	63,9 (26,1)	40,9 (20,9)	90,3 (25,5)	94,2 (36,2)
-45	68,2 (30,7)	40,7 (33,5)	87,8 (23,9)	73,9 (28,3)
45	60,9 (16,9)	74,2 (43,0)	81,9 (12,7)	97,3 (48,2)
90	63,7 (25,5)	61,8 (37,2)	81,5 (27,1)	109,3 (37,6)
135	54,8 (35,7)	30,5 (29,0)	74,1 (23,9)	93,9 (46,0)
180	41,0 (21,7)	20,3 (18,6)	60,5 (23,9)	53,6 (36,9)
225	39,0 (28,8)	13,6 (10,3)	44,4 (24,9)	38,8 (24,2)
270	17,5 (20,2)	10,2 (5,9)	19,5 (21,6)	30,7 (10,9)
315	10,3 (11,1)	/	2,9 (0,3)	/

5.2.2. Mouvement de rotation et posture finale atteinte

L'ensemble de nos résultats sur la définition de la posture de saisie semble apporter des résultats proches des comportements observés expérimentalement. Cependant, l'objectif final de notre travail serait de tendre vers une simulation de mouvement complet et non de postures-clé uniquement. Nous avons donc poursuivi cet objectif en simulant des mouvements complets (voir méthodologie partie 5.1.1.2) à partir des postures de saisie obtenues par la 4^e proposition exposée. La Figure 5-9 représente cette évolution du mouvement, normalisée par la rotation de l'objet, pour une tâche de 270° dans le sens antihoraire (voir annexe B pour un exemple à 90° dans le sens horaire). Ces résultats sont mis au regard des évolutions moyennes (tous sujets confondus) de PIV et SUP enregistrés expérimentalement.

Nous pouvons constater dans un premier temps que l'utilisation des coefficients proposés par Wang en 1999 semble aboutir à une cinématique proche des données expérimentales. Cependant, l'évolution simulée des degrés de liberté tend à être moins linéaire qu'elle ne l'est chez les sujets observés. Cela peut s'expliquer par le fait que l'évolution moyenne réelle est le résultat de plusieurs sujets. Ainsi, il est possible que les sujets adoptent différentes stratégies, aboutissant à une observation moyenne linéaire. D'autre part, aucune variabilité sur le

mouvement en lui-même (transition de la posture de saisie à la fin de rotation) n'a été intégrée à notre algorithme. En effet, il serait intéressant d'envisager différentes stratégies de transition de la posture de saisie à la fin du mouvement. Nous pourrions ainsi envisager une participation plus importante de PIV ou SUP en début de mouvement et une tendance inverse en fin de rotation par exemple. Cela impliquerait de regarder les différentes stratégies existantes au cours du mouvement sur les données expérimentales. Ainsi, il se pourrait qu'un algorithme proposant différentes stratégies pour une même tâche tende à linéariser l'évolution normalisée moyenne de PIV et SUP. Cela reste bien entendu à vérifier dans la pratique.

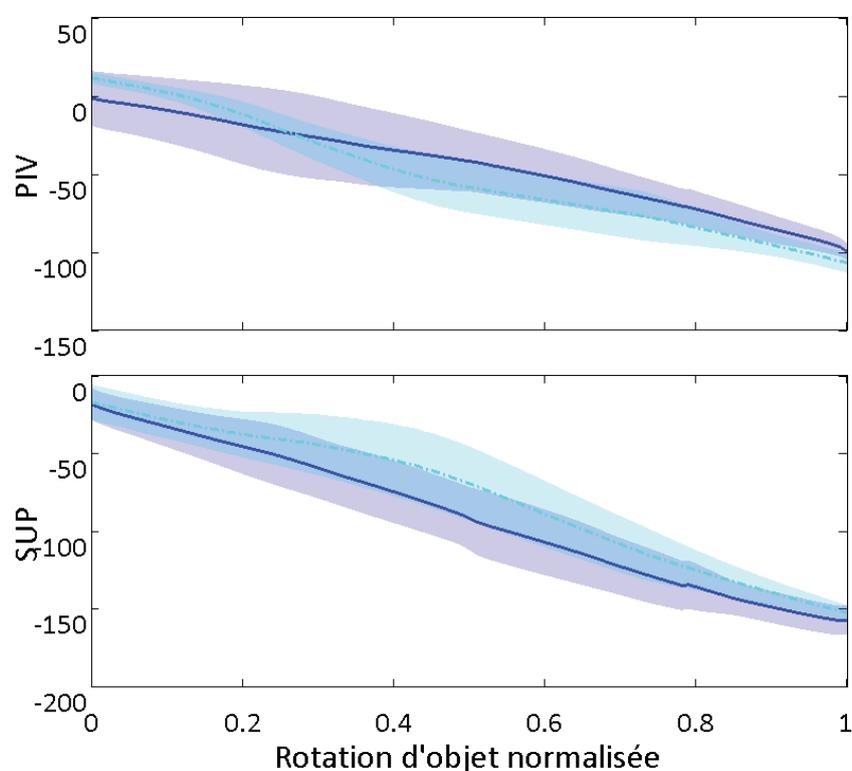


Figure 5-9. Comparaison de l'évolution des angles PIV (graphique supérieur) et SUP (graphique inférieur) réels (bleu foncé) et simulés (bleu clair en pointillés) pour une tâche de rotation de 270° dans le sens antihoraire. Les données sont normalisées en fonction de l'angle de rotation de l'objet du début à la fin de la rotation. Les données réelles représentent l'évolution moyenne, tous sujets confondus, encadrée par une zone représentant plus ou moins un écart type. De la même façon, les données simulées représentent les résultats moyens pour le sujet considéré en entrée de l'algorithme

5.3. Discussions

Nous avons proposé et comparé dans ce chapitre quatre propositions permettant de simuler une posture de saisie en fonction d'une consigne correspondant à une amplitude de rotation quelconque. Parmi ces solutions, nous avons avancé une méthode permettant la prise en compte de la variabilité du mouvement humain. Nous avons pu observer que cette dernière solution semble être en mesure de prédire différentes cinématiques du bras pour une même tâche, avec un minimum d'informations, à savoir les données anthropométriques du sujet, la position de l'objet et son axe de rotation. Les résultats observés sont prometteurs dans le sens où les évolutions dues à l'amplitude de la consigne sont comparables aux données expérimentales du 3. Bien que les résultats de simulation n'aient été présentés que pour des amplitudes testées expérimentalement, il faut noter ici que ceci n'est nullement une limitation à l'algorithme proposé. En effet, nous avons restreint nos choix aux amplitudes testées expérimentalement afin de pouvoir comparer les résultats fournis par nos simulations plus facilement. La limitation dans le choix de l'amplitude de la consigne vient de la précision donnée à la tâche qui est de un degré dans le cas présent.

D'autre part, il est nécessaire de préciser quelques limitations aux simulations exposées. En effet, la première est qu'un seul sujet n'a été considéré pour le moment. La prochaine étape serait d'étendre le travail en testant différentes capacités en termes de limites articulaires, chose qui n'a pu être envisagée ici pour les cônes de circumduction du poignet et de l'épaule. En effet, aucune mesure de capacité fonctionnelle de l'épaule ou du poignet n'a été effectuée dans la partie expérimentale.

Une autre limitation en lien avec l'algorithme proposé est l'amplitude de rotation possible par le sujet. Nous n'avons pas pu simuler de mouvement pour la tâche à $+315^\circ$ étant données les contraintes imposées à l'algorithme, à savoir (comme exposé dans le 4), aucun mouvement d'épaule autorisé, et aucun degré de liberté considéré au-delà du poignet (participation des doigts négligée). Ce choix a été fait afin de correspondre aux consignes données aux sujets de la partie expérimentale à savoir ne pas utiliser les doigts, le buste ou la clavicule pour tourner l'objet, et conserver une prise fixe tout au long de la rotation. D'autre part, l'inclusion des degrés de liberté des doigts engendrerait un problème plus complexe, avec la nécessité de considérer plusieurs points de contact entre les doigts et l'objet. Ce problème est souvent résolu dans la littérature en ne considérant que la main, désolidarisée du membre supérieur

(Huang et al., 1995 ; Miller, 2001 ; Endo et al., 2007a ; Endo et al., 2007b ; Endo, 2009). Ainsi, Endo par exemple s'est proposé de ne considérer que deux points de contacts entre l'objet et la main (Endo, 2009). Cependant, il est nécessaire que ce soit l'utilisateur qui définisse ces points *a priori*, rendant l'utilisation de son outil restreinte à des utilisateurs avertis.

Si nous voulons aller vers un outil nécessitant moins de connaissances de la part de l'utilisateur, il est nécessaire de perfectionner la méthodologie développée ici, en particulier la méthodologie incluant de la variabilité dans le mouvement. En effet, nous sommes conscients que l'ensemble des points de contact admissibles mathématiquement n'est pas forcément équiprobable. Nous avons pu constater que la proposition n°3 (point de saisie au niveau du barycentre des points admissibles) engendre une tendance comparable aux données expérimentales. Il serait alors intéressant d'aller vers un modèle aléatoire associé à une densité de probabilité favorisant par exemple les points aux environs proches du barycentre. Ceci n'est qu'une idée qu'il faudrait bien sûr approfondir en s'appuyant sur des modèles statistiques adaptés.

Il faut cependant noter ici que la variabilité du mouvement n'est pas la seule conséquence du point de contact entre la paume de main et l'objet. Nous avons pu ainsi observer que bien que l'orientation de main tende à maximiser la marge de pivot pour un point de contact donné, il subsiste une gamme d'orientations possibles autour de cet optimum. Enfin, nous avons également évoqué la possibilité de plusieurs stratégies de transition entre la posture de saisie et la fin de rotation. Il serait donc intéressant de poursuivre ces travaux en ajustant les possibilités de variation autorisées par l'algorithme dans son ensemble. Un premier pas dans cette direction est aisément envisageable en faisant varier les coefficients de la fonction de coût f utilisée. En effet, une modification de ces derniers devrait nous permettre de nous orienter vers la simulation de stratégies différentes.

6 Conclusion générale et perspectives

Ce manuscrit avait pour but, à partir de l'analyse de mouvements réels, d'être en mesure de proposer un algorithme de simulation capable de produire un mouvement réaliste. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés dans un premier temps sur l'observation d'une tâche simple de rotation d'un objet sphérique par le membre supérieur afin de comprendre les mécanismes de contrôle sous-jacents à un tel mouvement en fonction de l'amplitude et du sens de rotation. Dans un second temps, nous avons cherché à explorer l'espace des mouvements admissibles par les butées articulaires du bras pour comprendre les effets des limites articulaires et tester différentes hypothèses avancées dans la littérature, notamment l'hypothèse de confort final et le principe de travail minimum. Enfin, l'ensemble des résultats et analyses nous a amenés à considérer des lois de contrôle pouvant être implémentées dans un outil de simulation de la tâche étudiée.

6.1. Principales contributions

Ce travail de thèse contribue principalement à la compréhension du contrôle de mouvement et au développement de l'algorithme de simulation de mouvement.

En ce qui concerne la compréhension sur le contrôle d'un mouvement multi-séquentiel, nous avons observé que la tâche affecte non seulement le mouvement de la phase de manipulation, mais aussi la phase d'approche et de saisie. Les caractéristiques spatio-temporelles de la phase d'atteinte sont fortement dépendantes de la tâche à effectuer. Dans le cas d'une tâche de rotation de sphère, nous avons pu constater une anticipation posturale au moment de la saisie, principalement en fonction du sens de la rotation à produire. En effet, une rotation dans le sens horaire engendre une posture présentant un avant-bras en pronation complète quelle que soit l'amplitude de rotation, tandis que le coude se lève (ajustement par l'angle de pivot) quand l'amplitude augmente. A l'inverse, nous avons constaté une position du coude près du corps (angle de pivot aux alentours de zéro) quelle que soit l'amplitude de rotation dans le sens antihoraire, avec un ajustement de la posture venant principalement de l'angle de prono-supination lorsque l'amplitude requise par la tâche augmente. Ce phénomène d'anticipation semble être en accord avec la théorie de confort final. Cette dernière implique

que le mouvement serait effectué de manière à favoriser le confort en fin de mouvement, au risque de dégrader le niveau de confort en début de mouvement. Cette hypothèse a été vérifiée par la simulation de la marge de mobilité du bras au début et en fin de rotation en supposant que le niveau de confort augmentait avec la marge de mobilité disponible. En effet, nous avons observé que la marge de mobilité en fin de manipulation est généralement plus grande de celle au moment de la saisie. L'observation expérimentale semble aussi en accord avec la théorie de travail minimum. En effet, tout particulièrement dans le sens horaire de rotation, l'ajustement de la posture de saisie par l'angle de pivot implique que les sujets ont élevé le coude seulement si nécessaire. Cela permet ainsi de limiter le travail nécessaire à l'élévation du coude quand cela est possible. Cependant, bien que le confort final semble être plus privilégié que l'état de confort au moment de la saisie, nous avons pu constater, par l'analyse de l'éloignement de l'angle de pivot par rapport à ses valeurs limites dans les deux sens, que le confort initial serait également pris en compte (et non uniquement le confort final) en évitant l'élévation du coude au moment de la saisie (hypothèse de travail minimum). L'ensemble de nos résultats par analyse directe des données expérimentales et par simulation de l'espace des mouvements admissibles suggère que le mouvement de manipulation d'objet résulte d'un compromis entre le confort initial et final en accord avec le principe de travail minimum. Il faut cependant souligner une grande variabilité de mouvements intra- et interindividuelle notamment pour des tâches avec une faible amplitude de rotation. Ceci pourrait suggérer que le mouvement choisi ne suit pas strictement ces lois de performance.

En ce qui concerne le développement des algorithmes de simulation de mouvement, nous avons focalisé principalement notre travail sur la détermination de posture(s) intermédiaire(s) pour un mouvement multi-séquentiel. Dans le cas d'une rotation de sphère, il s'agit de la posture de saisie. Grâce à l'exploration de l'espace de solutions admissibles, le choix du point de contact, de l'attitude de la main autour de ce point et de l'angle de pivot ont été examinés en détail par simulation. Quatre différentes solutions sont proposées pour prédire la posture de saisie, y compris une solution impliquant un paramètre variable, à savoir le point de saisie de l'objet. Le modèle proposé semble présenter des résultats encourageants pour un outil prenant en compte la variabilité humaine au moment de la saisie de l'objet et sur la cinématique du mouvement de rotation qui en découle.

Il faut souligner l'approche originale d'explorer l'espace de postures admissibles par les limites articulaires. Grâce à cette exploration, nous avons pu aller au-delà de l'analyse directe des données expérimentales pour tester différentes hypothèses sur le contrôle de mouvement.

Nous avons pu ainsi voir ce qui pourrait se passer si un mouvement différent de celui réellement observé avait été adopté.

6.2. Limitations et perspectives

Il est nécessaire de noter quelques limitations liées aux travaux proposés afin de pouvoir envisager la suite de ce travail ou tout autre projet sur la simulation de tâches manuelles pour aboutir à un outil complet de simulation ergonomique.

En effet, bien que la tâche étudiée se veuille proche d'une tâche naturelle qu'on pourrait rencontrer en milieu industriel, nous avons dû imposer des instructions aux sujets au cours de l'expérimentation, qui pourraient rendre les mouvements non naturels. Il a été demandé aux sujets de garder la même saisie au cours du mouvement sans possibilité de ressaisir, ni de bouger le buste (et ainsi impliquer des mouvements de la clavicule ou de la colonne vertébrale par exemple). Il serait intéressant dans le futur d'observer des mouvements plus naturels notamment sans imposer de consignes restrictives pour étudier plus justement la coordination tronc/bras et le phénomène de ressaisie d'objet au cours d'une manipulation. Dans ce travail, seul un objet sphérique a été étudié avec une tâche de rotation dans un environnement sans obstacles. Il serait intéressant d'étendre à d'autres formes d'objets et d'autres tâches dans un environnement encombrant fréquemment rencontrées dans le milieu industriel.

Dans ce travail, seuls les 7 degrés de liberté (DDLs) du bras ont été considérés dans le modèle cinématique, sans inclure ceux du tronc (y compris la clavicule) et des doigts. Or, pour envisager les tâches manuelles, un modèle du membre supérieur devrait inclure ces degrés de liberté pour représenter au mieux la structure anatomique de ce dernier. D'autre part, nous avons abordé ici l'effet des limites articulaires au cours de la tâche de rotation. Or, nous n'avons pas accès à l'ensemble des capacités fonctionnelles des différents degrés de liberté de chaque sujet, ce qui nous a forcés à utiliser des valeurs de la littérature au moment de nos simulations. Il serait donc nécessaire d'envisager l'utilisation de données plus réalistes. Des données sur les limites articulaires des doigts semblent manquantes aussi. Le travail sur la modélisation des limites articulaires devrait être poursuivi. Par ailleurs, nous n'avons pas non plus abordé le problème de la prédiction de la posture de la main (en considérant les doigts) en fonction des caractéristiques de l'objet à saisir et de la tâche à effectuer.

Enfin, nous devons noter ici que la tâche étudiée ne présentait que très peu d'effort à appliquer par le sujet au cours de la rotation. Or, une tâche de manipulation nécessite souvent l'application d'une force plus moins grande au cours de sa réalisation. Nous devons donc répondre à la question : quelle posture/mouvement est adopté(e) par un sujet selon le niveau d'effort exigé par la tâche à effectuer? Ainsi, la simulation d'une tâche manuelle nécessiterait l'ajout d'un paramètre d'entrée, à savoir le niveau d'effort au cours de la tâche. Dès lors, une phase expérimentale sur l'effet du niveau d'effort sur le mouvement de rotation serait nécessaire afin de savoir comment prendre en compte ce facteur dans un algorithme de simulation. Des travaux sont actuellement en cours sur le sujet. En effet, une collaboration entre le Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs (Ifsttar) et le Motor Control Lab (Pennsylvania State University) a eu lieu grâce à un financement de la Région Rhône-Alpes. Cette collaboration a été l'occasion d'une collecte de données basée sur le protocole expérimental du 3. La tâche étudiée dans ce nouveau protocole consiste en une rotation de sphère autour d'un axe fixe, présentant différents niveaux de résistance à la rotation. Les résultats de cette seconde expérimentation devraient nous permettre d'ajuster l'algorithme présenté de manière à prendre en compte ce nouveau paramètre et ainsi affiner cette nouvelle génération de modèles numériques se rapprochant plus de l'humain en considérant sa variabilité d'action et permettant ainsi de mieux anticiper des problèmes liés au mouvement, tels que les troubles musculo-squelettiques.

Bibliographie

Alazmani, A., P. Culmer, M. Levesley, M. Mon-Williams, and B. Bhakta (2009). The coordination of upper and lower arm rotation. *Experimental Brain Research* 192(4), 635–649.

Arbib, M. A. (1981). Perceptual structures and distributed motor control. *Comprehensive Physiology*.

Ausejo, S. and X. Wang (2009). Motion capture and human motion reconstruction. In *Handbook of Digital Human Modeling: Research for Applied Ergonomics and Human Factors Engineering*.

Badler, N., C. Phillips, and B. Webber (1993). *Simulating humans: computer graphics animation and control*. Oxford University Press, USA.

Bertilsson, E., D. Högberg, and L. Hanson (2010). Digital human model module and work process for considering anthropometric diversity. In *Advances in Applied Digital Human Modeling*.

Bonnefoy, A., N. Louis, and P. Gorce (2009). Muscle activation during reach-to-grasp movement in sitting position: influence of the distance. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 19, 269–275.

Chaffin, D. (2005, April). Improving digital human modelling for proactive ergonomics in design. *Ergonomics* 48(5), 478–491.

Chaffin, D. (2009). Some requirements and fundamental issues in digital human modeling. *Handbook of digital human modeling*, 2.1–2.10.

Chateauroux, E., X. Wang, and J. Trasbot (2007). A database of ingress/egress motions of elderly people. In *SAE International Conference of Digital Human Modelling*.

Condi, B. (2008). Analyse de postures et de mouvements de préhension d'objets, étude de l'interaction main/objet en vue de sa simulation. Master's thesis, Université de Lyon.

Cruse, H. and M. Brüwer (1987). The human arm as a redundant manipulator: the control of path and joint angles. *Biological Cybernetics* 57, 137–144.

Cruse, H., E. Wischmeyer, M. Brüwer, P. Brockfeld, and A. Dress (1990). On the cost functions for the control of the human arm movement. *Biological Cybernetics* 62, 519–528.

Dean, J. and M. Brüwer (1995). Control of human arm movement in two dimensions: Use of the wrist in short pointing movements. *Human Movement Science 14*, 165–204.

Delleman, N. J., C. M. Haslegrave, and D. B. Chaffin (2004). *Working postures and movements - Tools for evaluation and engineering*. CRC Press.

Desmurget, M., H. Gréa, and C. Prablanc (1998). Final posture of the upper limb depends on the initial position of the hand during prehension movements. *Experimental Brain Research 119*, 511–516.

Desmurget, M., C. Prablanc, M. Arzi, Y. Rossetti, Y. Paulignan, and C. Urquizar (1996). Integrated control of hand transport and orientation during prehension movements. *Experimental Brain Research 110*, 265–278.

Duffy, V. (2009). *Handbook of digital human modeling: research for applied ergonomics and human factors engineering*. CRC Press, Inc.

Endo, Y. (2009). *A study of virtual ergonomic assessment using digital hand*. Ph. D. thesis, Information Science and Technology, Hokkaido University.

Endo, Y., S. Kanai, T. Kishinami, N. Miyata, M. Kouchi, and M. Mochimaru (2007a). Virtual ergonomic assessment on handheld products based on virtual grasping by digital hand. In *Digital Human Modeling for Design and Engineering Conference*.

Endo, Y., S. Kanai, T. Kishinami, N. Miyata, M. Kouchi, and M. Mochimaru (2007b). Virtual grasping assessment using 3D digital hand model. In *Annual Applied Ergonomics Conference: Celebrating the Past-Shaping the Future*.

Engin, A. E. and S.-M. Chen (1986). Statistical data base for the biomechanical properties of the human shoulder complex – i: Kinematics of the shoulder complex. *Journal of Biomechanical Engineering 108*, 215–227.

Fan, J., J. He, and S. I. Helms Tillery (2006). Control of the hand orientation and arm movement during reach and grasp. *Experimental Brain Research 171*, 283–296.

Faraway, J. (1997). Regression analysis for a functional response. *Technometrics 39*(3), 254–261.

Faraway, J. J. (2000). Modeling reach motions using functional regression analysis. In *SAE Technical paper series*, Number 2000-01-2175. Society of Automobile Engineers.

Feldman, A. (1966). Functional tuning of the nervous system with control of movement or maintenance of a steady posture. II. controllable parameters of the muscle. *Biophysics 11*(3), 565–578.

Feldman, A. G. (1986). Once more on the equilibrium-point hypothesis (lambda model) for motor control. *Journal of motor behavior 18*(1), 17–54.

Feldman, A. G. (2010). How the brain solves redundancy problems. *Motor Control 14*, e1–e5.

Feyen, R., Y. Liu, D. Chaffin, G. Jimmerson, and B. Joseph (2000). Computer-aided ergonomics: a case study of incorporating ergonomics analyses into workplace design. *Applied Ergonomics 31*(3), 291–300.

Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology 47*, 381–391.

Flash, T. and N. Hogan (1985). The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model. *The Journal of Neuroscience 5*, 1688–1703.

Gentilucci, M., U. Castiello, M. Corradini, M. Scarpa, C. Umiltà, and G. Rizzolatti (1991). Influence of different types of grasping on the transport component of prehension movements. *Neuropsychologia 29*(5), 361–378.

Gielen, C., B. van Bolhuis, and M. Theeuwes (1995). On the control of biologically and kinematically redundant manipulators. *Human Movement Science 14*, 487–509.

Gleicher, M. (2001). Comparing constraint-based motion editing methods. *Graphical Models 63*, 107–134.

Herbort, O. and M. V. Butz (2010, May). Planning and control of hand orientation in grasping movements. *Experimental Brain Research 202*(4), 867–878.

Huang, Z., R. Boulic, N. Magnenat-Thalmann, and D. Thalmann (1995). A multi-sensor approach for grasping and 3D interaction. In *Computer Graphics International*.

Jacquier-Bret, J., P. Gorce, and N. Rezzoug (2012). The manipulability: a new index for quantifying movement capacities of upper extremity. *Ergonomics 55*(1), 69–77.

Jeannerod, M. (1981). Intersegmental coordination during reaching at natural visual objects. *Attention and Performance IX*, 153–168.

Jeannerod, M. (1984). The timing of natural prehension movements. *Journal of Motor Behavior* 16, 235–254.

Johnson, M. E. and K.-N. An (1994). Biomechanical analysis of reach and grasp. *Advances in psychology* 105, 269–279.

Jung, E., D. Kee, and M. Chung (1995). Upper body reach posture prediction for ergonomic evaluation models. *International Journal of Industrial Ergonomics* 16, 95–107.

Jung, E. S. and J. Choe (1996). Human reach posture prediction based on psychophysical discomfort. *International Journal of Industrial Ergonomics* 18(2), 173–179.

Kang, T., J. He, and S. I. Tillery (2005). Determining natural arm configuration along a reaching trajectory. *Experimental Brain Research* 167, 352–361.

Kattel, B. P., T. K. Fredericks, J. E. Fernandez, and D. C. Lee (1996). The effect of upper-extremity posture on maximum grip strength. *International Journal of Industrial Ergonomics* 18(5), 423–429.

Kee, D. and W. Karwowski (2001). Luba: an assessment technique for postural loading on the upper body based on joint motion discomfort and maximum holding time. *Applied Ergonomics* 32(4), 357 – 366.

Kee, D. and W. Karwowski (2003). Ranking systems for evaluation of joint and joint motion stressfulness based on perceived discomforts. *Applied Ergonomics* 34(2), 167 – 176.

Kim, S., C.-H. Kim, and J. H. Park (2006). Human-like arm motion generation for humanoid robots using motion capture database. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3486–3491. IEEE.

Korein, J. U. (1985). *A geometric investigation of reach*. Ph. D. thesis, The Massachusetts Institute of Technology.

Krüger, M., B. Borbély, T. Eggert, and A. Straube (2012). Synergistic control of joint angle variability: Influence of target shape. *Human Movement Science* 31(5), 1071–1089.

Kudoh, N., M. Hattori, N. Numata, and K. Maruyama (1997). An analysis of spatiotemporal variability during prehension movements: effects of object size and distance. *Experimental Brain Research* 117, 457–464.

Lämkkull, D., L. Hanson, and R. Örtengren (2009). A comparative study of digital human modelling simulation results and their outcomes in reality: A case study within manual assembly of automobiles. *International Journal of Industrial Ergonomics* 39, 428–441.

Lardy, J., X. Wang, G. Beurier, and T. Robert (2010). Arm movement coordination when rotating a spherical object. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 13(S1), 83–85.

Latash, M. L. (2010a). Motor synergies and the equilibrium-point hypothesis. *Motor Control* 14, 294–322.

Latash, M. L. (2010b). Two archetypes of motor control research. *Motor Control* 14, e41–e53.

Latash, M. L. (2012). *Fundamentals of motor control*. Academic Press.

Lee, D. N. (2005). Tau in action in development. *Action as an organizer of learning and development*, 3–49.

Lepoutre, F. (1993). Human posture modelisation as a problem of inverse kinematic of redundant robots. *Robotica* 11(04), 339–343.

Liégeois, A. (1977). Automatic supervisory control of configuration and behavior of multibody mechanisms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 7(12), 861–871.

Lim, S., B. J. Martin, and M. K. Chung (2004). The effects of target location on temporal coordination of the upper body during 3D seated reaches considering the range of motion. *International Journal of Industrial Ergonomics* 34, 395–405.

Loeb, G. E. (2010). Is there an equilibrium point hypothesis? *Motor Control* 14, e19–e22.

Louis, N. and P. Gorce (2009). Upper limb muscle forces during a simple reach-to-grasp movement: a comparative study. *Medical and Biological Engineering and Computing* 47, 1173–1179.

Maciejewski, A. A. and C. A. Klein (1985). Obstacle avoidance for kinematically redundant manipulators in dynamically varying environments. *The international journal of robotics research* 4(3), 109–117.

McKenzie, C. and T. Iberall (1994). *Advances in psychology*, Volume 104 : The grasping hand. North Holland.

McKenzie, C., R. Marteniuk, C. Dugas, D. Liske, and B. Eickmeier (1987). Three-dimensional movement trajectories in Fitts' task: Implications for control. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology* 39(4), 629–647.

Miller, A. T. (2001). *GraspIt!: A versatile simulator for robotic grasping*. Ph. D. thesis, Graduate School of Arts and Sciences, Columbia University.

Mombaur, K., A. Truong, and J.-P. Laumond (2010). From human to humanoid locomotion - an inverse optimal control approach. *Autonomous Robots* 28(3), 369–383.

Monnier, G. (2004). *Simulation de mouvements humains complexes et prédiction de l'inconfort associé - Application à l'évaluation ergonomique du bouclage de la ceinture de sécurité*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

Monnier, G., F. Renard, A. Chameroy, X. Wang, and J. Trasbot (2006). A motion simulation approach integrated into a design engineering process. In *Digital Human Modeling for Design and Engineering Conference*.

Monnier, G., X. Wang, and J. Trasbot (2009a). A motion simulation tool for automotive interior design. In *Handbook of Digital Human Modeling: Research for Applied Ergonomics and Human Factors Engineering*.

Monnier, G., X. Wang, and J. Trasbot (2009b). RPx, a motion simulation tool for car interior design. In *Handbook of digital human modeling: research for applied ergonomics and human factors engineering*.

Morasso, P. (1981). Spatial control of arm movements. *Experimental Brain Research* 42, 223–227.

Multon, F. (1998). *Contrôle du mouvement des humanoïdes de synthèse*. Thèse de doctorat, Université Rennes 1.

Multon, F., L. France, M.-P. Cani-Gascuel, and G. Debunne (1999). Computer animation of human walking: a survey. *The journal of visualization and computer animation* 10(1), 39–54.

Napier, J. (1956). The prehensile movements of the human hand. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume* 38-B(4), 902–913.

O'Sullivan, L. and T. Gallwey (2005). Forearm torque strengths and discomfort profiles in pronation and supination. *Ergonomics* 48(6), 703–721.

Pannetier, R. (2012). *Développement des modèles biomécaniques de l'humain pour l'évaluation ergonomique de commandes automobiles - Application à la pédale d'embrayage*. Ph. D. thesis, Université Claude Bernard Lyon 1.

Park, W., D. B. Chaffin, and B. J. Martin (2004, May). Toward memory-based human motion simulation: Development and validation of a motion modification algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 34(3), 376–386.

Park, W., D. Singh, and B. Martin (2006, December). A memory-based model for planning target reach postures in the presence of obstructions. *Ergonomics* 49(15), 1565–1580.

Paulignan, Y., V. Frak, I. Toni, and M. Jeannerod (1997). Influence of object position and size on human prehension movements. *Experimental Brain Research* 114, 226–234.

Paulignan, Y. and M. Jeannerod (1996). *Hand and Brain: The neurophysiology and psychology of hand movements*, Chapter 13-Prehension movements: The visuomotor channels hypothesis revisited, pp. 265–282. Academic press.

Reed, M. P., J. Faraway, D. B. Chaffin, and B. J. Martin (2006). The humosim ergonomics framework: A new approach to digital human simulation for ergonomic analysis. In *Digital Human Modeling for Design and Engineering*.

Rezzoug, N. and P. Gorce (2009). A reinforcement learning based neural network architecture for obstacle avoidance in multi-fingered grasp synthesis. *Neurocomputing* 72, 1229–1241.

Robert, T., G. Beurier, and X. Wang (2009). Arm postural anticipation for rotating a spherical object. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 12(S1), 217–218.

Roby-Brami, A., S. Jacobs, N. Bennis, and M. F. Levin (2003). Hand orientation for grasping and arm joint rotation patterns in healthy subjects and hemiparetic stroke patients. *Brain Research* 969, 217–229.

Roman-Liu, D. and T. Tokarski (2005). Upper limb strength in relation to upper limb posture. *International Journal of Industrial Ergonomics* 35, 19–31.

Rosenbaum, D. A. (2010). *Human motor control* (Second Edition ed.). Academic Press.

Rosenbaum, D. A., F. Marchak, H. J. Barnes, J. Vaughan, J. D. Slotta, and M. J. Jorgensen (1990). *Attention and Performance XIII*, Chapter 10 - Constraints for action selection: Overhand versus underhand grips, pp. 321–342. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Rosenbaum, D. A., C. M. van Heugten, and G. E. Caldwell (1996). From cognition to biomechanics and back: the end-state comfort effect and the middle-is-faster effect. *Acta Psychol (Amst)* 94(1), 59–85.

Savescu, A. V. (2006). *Analyse et modélisation du mouvement de préhension*. Thèse de doctorat, Université Claude-Bernard, Lyon 1.

Schot, W. D., E. Brenner, and J. B. Smeets (2010). Posture of the arm when grasping spheres to place them elsewhere. *Experimental Brain Research* 204, 163–171.

Shadmehr, R. (2010). From equilibrium point to optimal control. *Motor Control* 14, e25–e30.

Soechting, J. (1984). Effect of target size on spatial and temporal characteristics of a pointing movement in man. *Experimental Brain Research* 54, 121–132.

Soechting, J., C. Buneo, U. Herrmann, and M. Flanders (1995). Moving effortlessly in three dimensions: Does donder's law apply to arm movement? *The Journal of Neuroscience* 15(9), 6271–6280.

Tolani, D. and N. I. Badler (1996). Real-time inverse kinematics of the human arm. *Presence* 5(4), 393–401.

Tolani, D., A. Goswami, and N. I. Badler (2000). Real-time inverse kinematics techniques for anthropomorphic limbs. *Graphical Models* 62, 353–388.

Trevarthen, C. B. (1968). Two mechanisms of vision in primates. *Psychologische Forschung* 31(4), 299–337.

Uno, Y., M. Kawato, and R. Suzuki (1989). Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement. *Biological Cybernetics* 61, 89–101.

Unuma, M., K. Anjyo, and R. Takeuchi (1995). Fourier principles for emotion-based human figure animation. In *Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 91–96. ACM.

van der Vaart, A. (1995). *Arm movements in operating rotary controls*. Thèse de doctorat, Delft University of Technology.

Wang, X. (1998). Quantification en 3D du cône de circumduction du complexe articulaire du poignet. *Archives of physiology and biochemistry* 106(Supplement B), 96–96.

Wang, X. (1999a). A behavior-based inverse kinematics algorithm to predict arm prehension postures for computer-aided ergonomic evaluation. *Journal of Biomechanics* 32, 453–460.

Wang, X. (1999b). Three-dimensional kinematic analysis of influence of hand orientation and joint limits on the control of arm postures and movements. *Biological Cybernetics* 80, 449–463.

Wang, X., N. Chevalot, G. Monnier, and J. Trasbot (2006). From motion capture to motion simulation: an in-vehicule reach motion database for car design. In *SAE 2006 Transactions Journal of Passenger Car*.

Wang, X., N. Chevalot, and J. Trasbot (2008). Prediction of in-vehicule reach surfaces and discomfort by digital human models. In *DHM*.

Wang, X., M. Maurin, F. Mazet, N. De Castro Maia, K. Voinot, J.-P. Verriest, and M. Fayet (1998). Three-dimensional modelling of the motion range of axial rotation of the upper arm. *Journal of Biomechanics* 31, 899–908.

Wang, X. and J.-P. Verriest (1998). A geometric algorithm to predict the arm reach posture for computer-aided ergonomic evaluation. *The journal of Visualization and Computer Animation* 9(1), 33–47.

Wisner, A. (1995). *Réflexions sur l'ergonomie (1962-1995)*. Octarès.

Woodworth, R. S. (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psychological Monographs: General and Applied* 3(3), i–114.

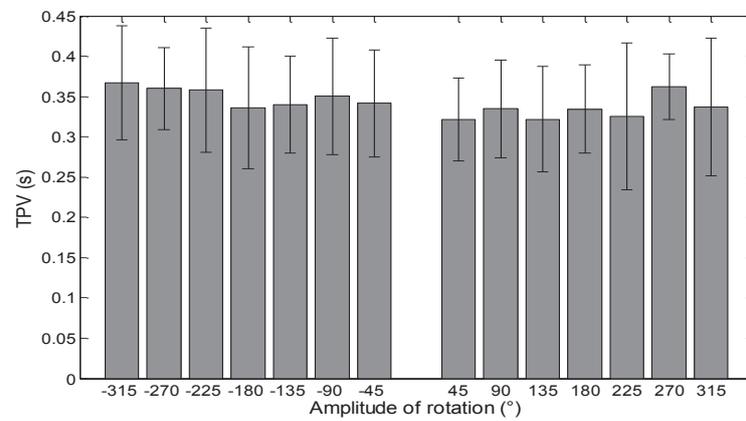
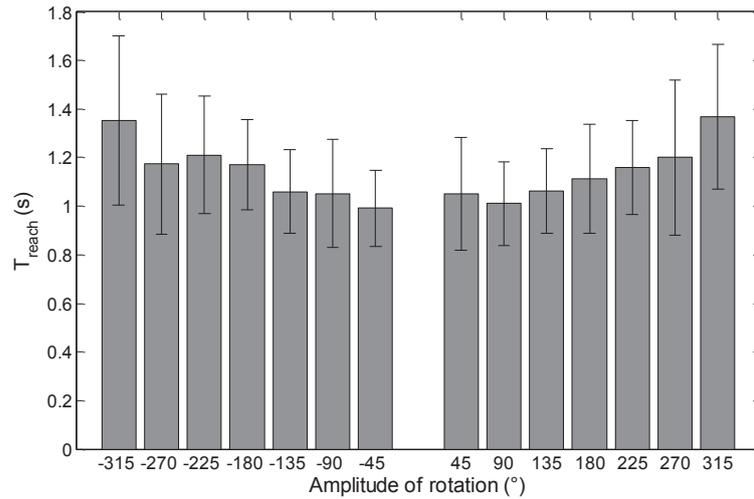
Zhang, X. and D. Chaffin (2000). A three-dimensional dynamic posture prediction model for in-vehicle seated reaching movements: development and validation. *Ergonomics* 43(9), 1314–1330.

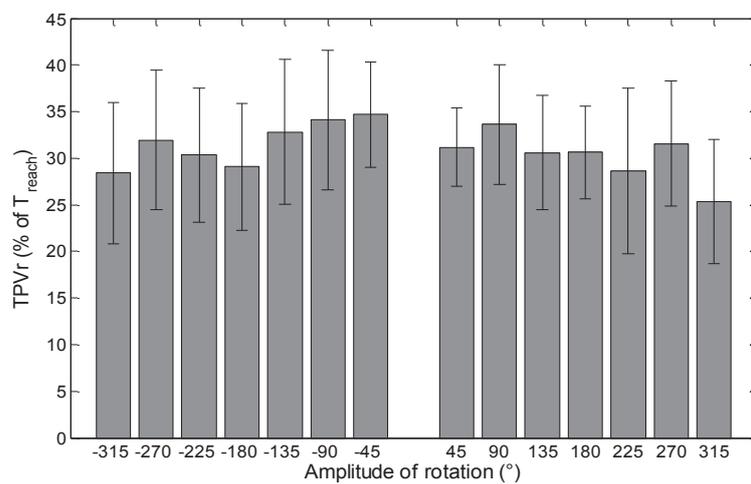
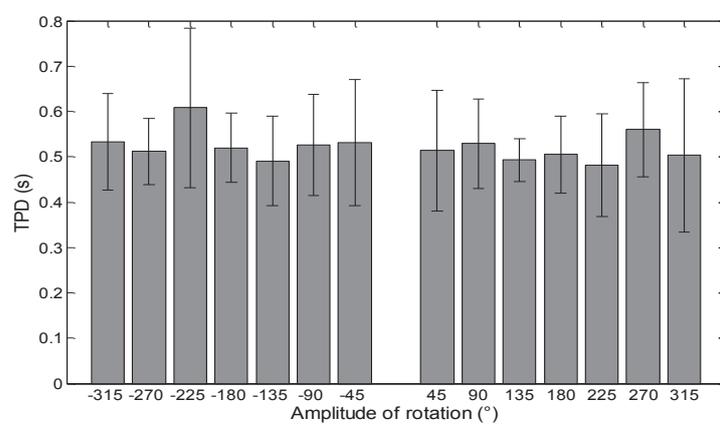
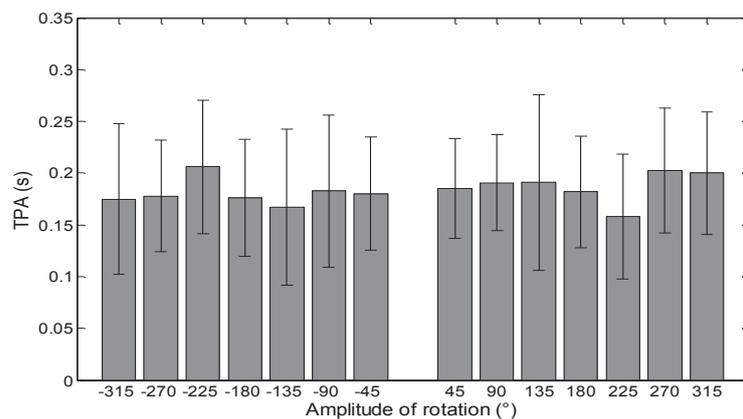
Zhang, X., A. D. Kuo, and D. B. Chaffin (1998). Optimization-based differential kinematic modeling exhibits a velocity-control strategy for dynamic posture determination in seated reaching movements. *Journal of Biomechanics* 31(11), 1035–1042.

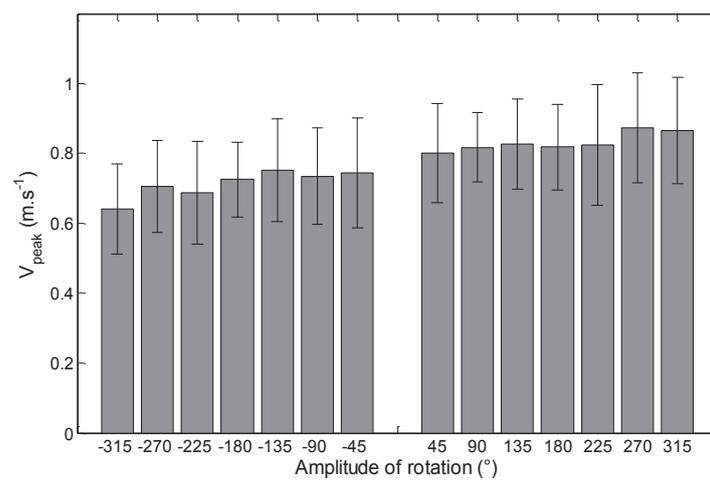
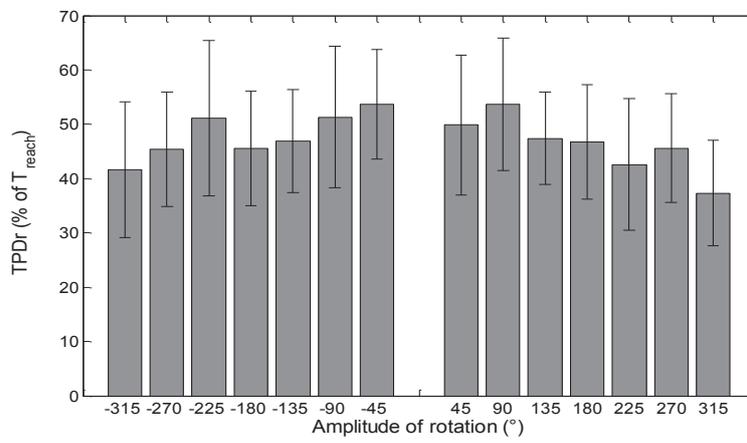
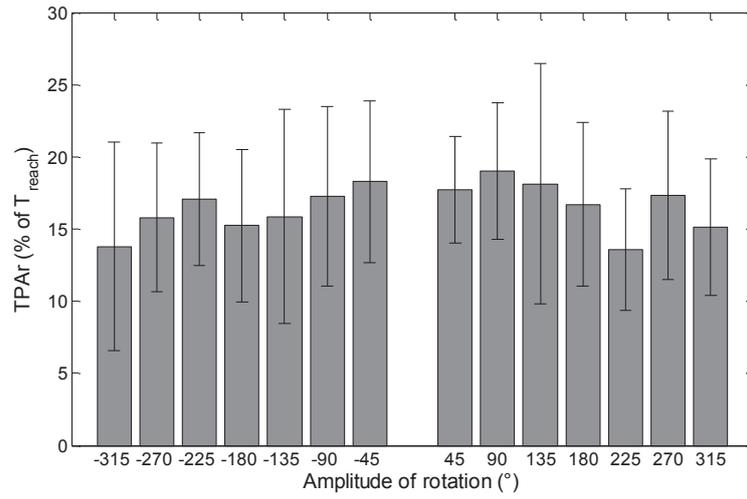
Zhao, J. and N. I. Badler (1994). Inverse kinematics positioning using nonlinear programming for highly articulated figures. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 13(4), 313–336.

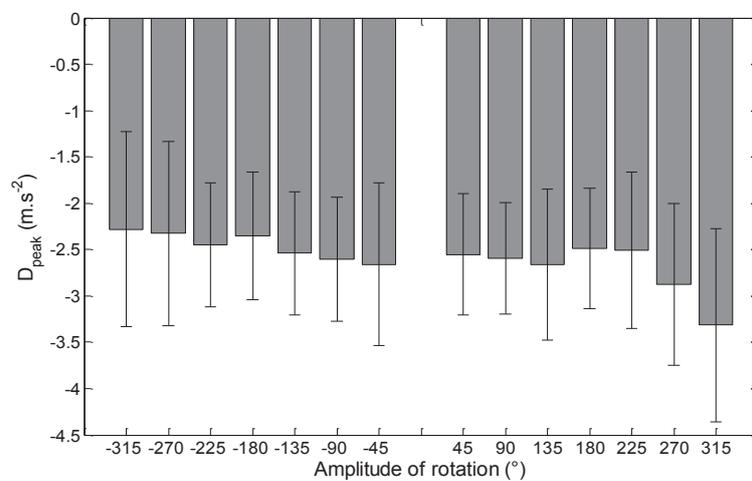
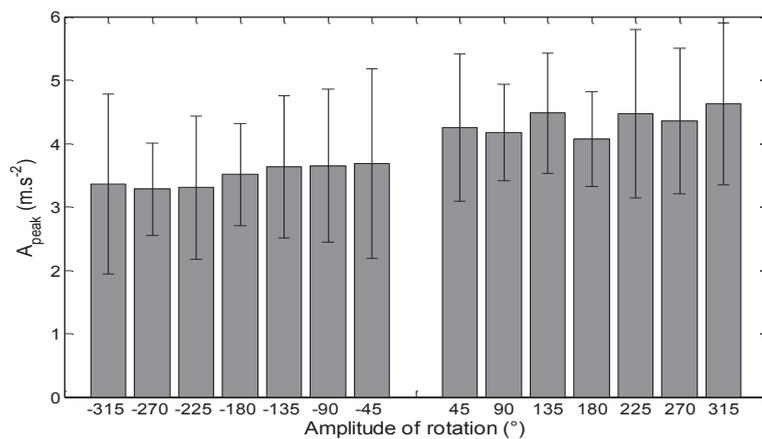
Annexes

A. Caractéristiques spatio-temporelles de l'atteinte en fonction de l'amplitude de rotation

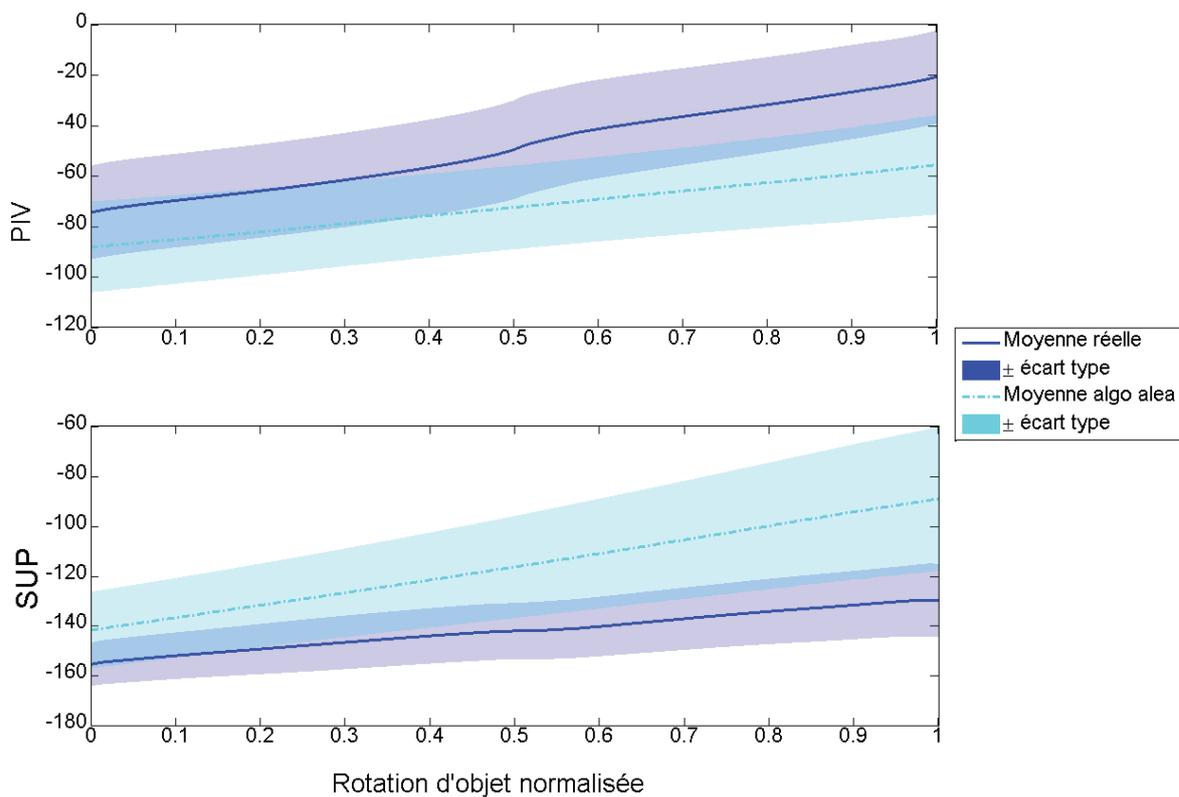








B. Comparaison de l'évolution des angles PIV et SUP réels et simulés pour une tâche de rotation de 90° dans le sens horaire.



Publications associées

Lardy, J., Wang, X., Beurier, G. and Robert, T. (2010). Arm movement coordination when rotating a spherical object. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 13(S1):83–85, présenté au 35^{ème} congrès annuel de la Société de Biomécanique, Le Mans

Lardy, J., Beurier, G. and Wang, X. (2012). Do people follow the principle of end-state comfort in a rotation task? 12^{ème} Symposium international sur l'Analyse 3D du mouvement humain, Bologne, Italie.

Lardy, J., Beurier, G. and Wang, X. (2012). Effects of rotation amplitude on arm movement when rotating a spherical object. *Ergonomics*, 55(12) : 1524-1534.

Analyse et simulation cinématique du mouvement du bras lors de la manipulation d'un objet pour la simulation ergonomique à l'aide d'un mannequin numérique

Le travail de thèse exposé dans ce manuscrit s'intéresse à la simulation d'un mouvement de manipulation d'objet, plus particulièrement à la saisie suivie de la rotation d'une sphère selon un axe fixe. Le but ici est, à partir d'une analyse de mouvements réels, d'être capable de proposer un algorithme de simulation reproduisant des mouvements comparables aux données expérimentales, en fournissant en entrée le moins d'informations possibles et en essayant d'introduire de la variabilité dans le mouvement simulé.

12 sujets volontaires ont participé à l'expérimentation. Nous leur avons demandé de saisir et de tourner une sphère de 60mm de diamètre avec des amplitudes allant de 45° à 360°, dans les deux sens. L'analyse de ces données expérimentales, complétée par des simulations de l'effet des limites articulaires sur le mouvement nous ont permis d'étudier plusieurs hypothèses sur le contrôle de mouvement telles que l'hypothèse de confort final (« end-state comfort ») et le principe de travail minimum. Une des conclusions majeures est que l'anticipation posturale au moment de saisie semble être expliquée davantage par le confort en fin de mouvement qu'au moment de saisie.

Basé sur ces observations, nous proposons un algorithme de simulation avec pour nouveautés la prise en compte de l'espace de mouvements admissibles par les limites articulaires ainsi que l'introduction de la variabilité au choix de la posture de saisie. Les premiers résultats semblent être en accord en grande partie avec les observations expérimentales donnant une base de travail pour aller vers des outils de simulation se rapprochant de plus en plus vers un comportement « humain ».

Mots-clés : manipulation, membre supérieur, simulation, variabilité, orientation de la main

Kinematics analysis and simulation of arm motion while handling an object for ergonomic simulation with a digital manikin

The thesis work presented in this manuscript focuses on the simulation of an handling motion, more specifically on the grasp followed by the rotation of a sphere along a fixed single axis. The aim here is, from the analysis of actual motions, to be able to propose an simulation algorithm reproducing motions comparable to experimental data, with the less input as possible and trying to introduce some variability into the simulated motion.

12 volunteers participated to the experiment. Subjects were asked to grasp and turn a sphere of 60mm of diameter. Amplitudes of rotations were ranged from 45° to 360°, in both directions. Experimental data analysis, completed with some simulations of the effect of joint limits on motion, allowed us to investigate several motion control hypothesis as the end-state comfort hypothesis or the minimum work principle. One of the main conclusions is that postural anticipation when grasping seems to be more explained by the comfort at the end of the motion than when grasping.

Based on these observations, we proposed a simulation algorithm being original by the way of how it takes into account possible motions allowed by joint limits and by the introduction of variability into the simulated grasp posture. The first results seem to follow most part of the experimental observations giving a strong basis to go towards simulation tools that will come closer to a “human” behavior.

Keywords: object manipulation, upper limb, simulation, variability, hand orientation