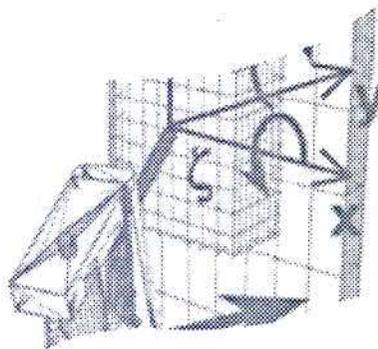


Influence de l'instabilité statique sur la force de serrage des outils à main mécaniques



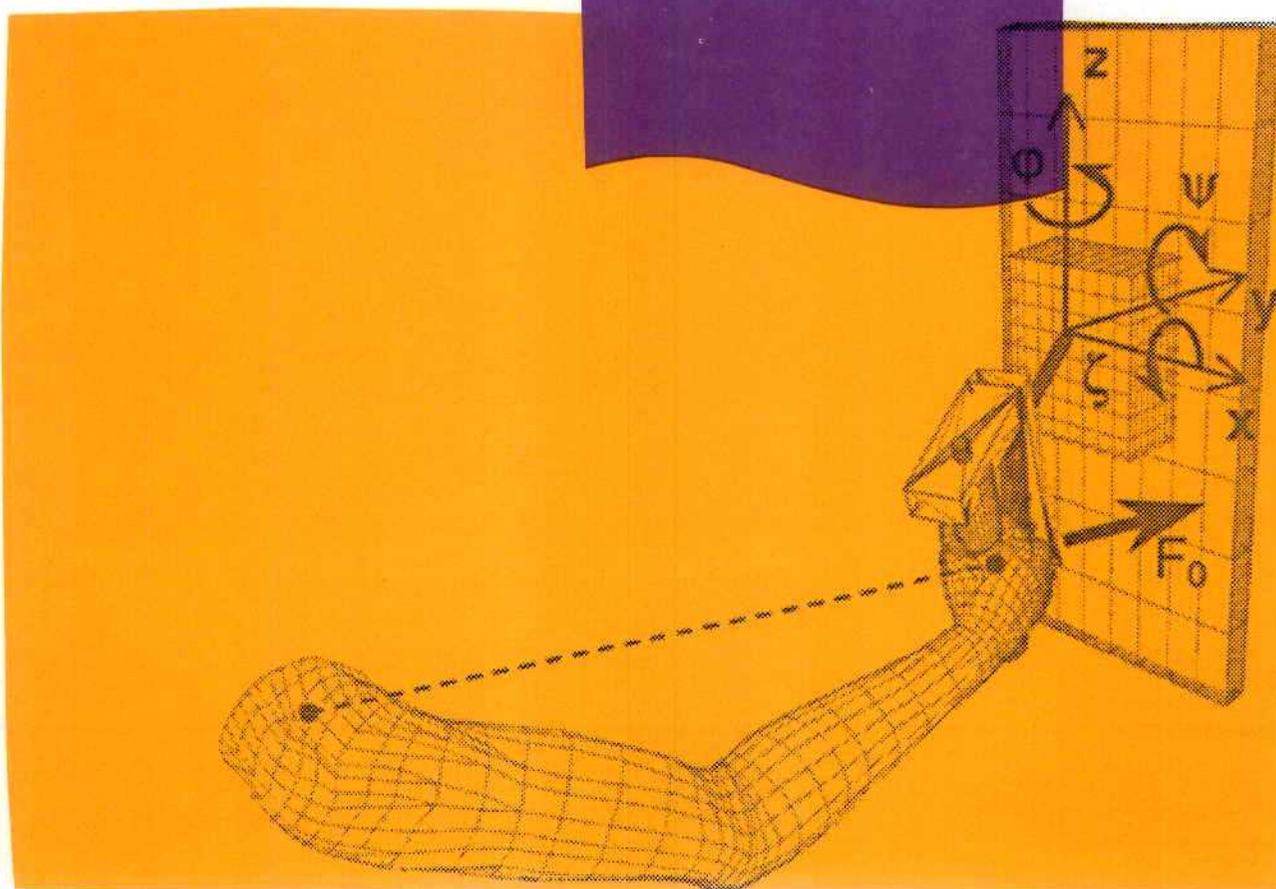
ÉTUDES ET RECHERCHES

Denis Rancourt

Octobre 2001

R-277

RAPPORT



La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et finance, par subvention ou contrats, des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

Pour tout connaître de l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par la CSST et l'Institut.

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications.

Il est possible de se procurer le catalogue des publications de l'Institut et de s'abonner à *Prévention au travail* en écrivant à l'adresse au bas de cette page.

ATTENTION

Cette version numérique vous est offerte à titre d'information seulement. Bien que tout ait été mis en œuvre pour préserver la qualité des documents lors du transfert numérique, il se peut que certains caractères aient été omis, altérés ou effacés. Les données contenues dans les tableaux et graphiques doivent être vérifiées à l'aide de la version papier avant utilisation.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec

IRSST - Direction des communications
505, boul. de Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1 551
Télécopieur: (514) 288-7636
Site internet : www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche en santé
et en sécurité du travail du Québec,

Influence de l'instabilité statique sur la force de serrage des outils à main mécaniques

Denis Rancourt,
Université Laval

ÉTUDES ET
RECHERCHES

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site internet de l'IRSST.

SOMMAIRE

L'utilisation d'outils à main mécaniques tels les perceuses, les riveteuses, les marteaux-piqueurs etc., constituent un danger potentiel pour les travailleurs en industrie. En effet, il semble reconnu que ces outils peuvent causer différentes atteintes du système neuro-musculo-squelettique tels le syndrome des vibrations ou le syndrome du canal carpien. Malgré plusieurs études, on ne connaît pas encore très bien l'étiologie de plusieurs maladies du système neuro-musculo-squelettique et les facteurs de risques identifiés sont souvent évalués empiriquement. Une avenue potentiellement intéressante pour mieux identifier l'origine de ces maladies est d'étudier des aspects fondamentaux du contrôle moteur humain lors de la manipulation d'outils à main. Or, à l'heure actuelle, les connaissances en contrôle moteur sur l'utilisation d'outils à main sont encore très peu développées.

Ce projet de recherche avait comme objectif d'investiguer un aspect particulier du contrôle moteur i.e. la fonction stabilisatrice du membre supérieur dans le contrôle d'outils. Nous avons investigué sa fonction stabilisatrice car nous croyons qu'elle représente un facteur important dans la demande musculaire d'une tâche. En effet, la fonction du membre supérieur n'est pas seulement d'appliquer des forces sur un outil mais, aussi, de le stabiliser dynamiquement, face à la présence de perturbations/instabilités dynamiques de l'environnement, et statiquement, face à des instabilités statiques inhérentes à la tâche. Nous avons analysé le rôle stabilisateur de la main lors de la production d'une force de poussée sur une tige pivotante. Bien que cette situation soit spécifique, elle fournit des informations importantes qui peuvent être extrapolées au contrôle d'outils à main. Lors de l'opération d'un outil, une rigidité minimale de la main doit être produite afin de le stabiliser. L'utilisateur peut tirer avantage de la rigidité translationnelle apparente de la main pour établir cette rigidité minimale ou il peut être mécaniquement plus avantageux d'utiliser la rigidité rotationnelle de la main. Le choix d'une technique de stabilisation plutôt qu'une autre peut avoir des conséquences importantes au niveau physiologique. En effet, si la rigidité translationnelle est plutôt utilisée, celle-ci sera établie en co-contractant les muscles qui rigidifient les articulations de l'épaule, du coude et du poignet. Par contre, si la rigidité rotationnelle est préférentiellement utilisée, les muscles participant à la force de serrage de l'outil pourraient être aussi impliqués afin d'établir une rigidité rotationnelle suffisante à l'interface outil-main. L'augmentation de la force de serrage pour aider à la stabilisation peut être défavorable pour la santé du travailleur car c'est un facteur susceptible d'être relié aux syndromes du canal carpien et des maladies vibratoires. Elle augmente en effet la pression dans le canal carpien et modifie l'impédance mécanique de la main qui détermine en partie le niveau de transmission des vibrations des outils vers la main. Il est évident que le niveau de force de serrage utilisé lors de la manipulation d'outils à main dépend de plusieurs facteurs, dont le poids de l'outil, la perception du danger de réaliser une tâche, la grosseur du manche de l'outil, le type de tâche à réaliser, le coefficient de frottement manche-main etc. Au cours du projet de recherche, nous avons déterminé si la force de serrage était aussi reliée au niveau d'instabilité statique de la tâche.

Dans un premier temps, nous avons conçu des dynamomètres pour caractériser la force de serrage. La validité des instruments a été évaluée expérimentalement tandis que la fiabilité a été analysée par un modèle biomécanique de la production de force par un doigt humain. Sous certaines conditions, on peut considérer que la mesure par dynamomètre peut donner une estimation valide du niveau de force de serrage utilisé. Grâce aux dynamomètres fabriqués, une expérience a été menée sur des sujets humains où la force de serrage était mesurée lors de la production d'une force sur une tige pivotante. Les résultats ont démontré une corrélation évidente entre force de serrage et instabilité statique de la tâche.

Dans un deuxième temps, afin de mieux contrôler les paramètres en jeu, nous avons poursuivi les études en analysant de quelle façon la force de serrage peut influencer la rigidité rotationnelle de la main. Deux processus ont été identifiés : un premier où les doigts sont rigidifiés et une rotation de l'outil engendre des changements de configuration des doigts et, par conséquent, une résistance à la rotation; et un deuxième où les propriétés mécaniques en cisaillement de la peau jouent un rôle important pour rigidifier l'interface outil-main en rotation. En augmentant la force de serrage, on augmenterait les propriétés en cisaillement et par extension, la rigidité rotationnelle de la main. Ainsi, le potentiel de stabilisation par la rigidité rotationnelle prend une importance significative et nous avons donc étudié expérimentalement si la rigidité rotationnelle de la main a un rôle potentiel important pour stabiliser les tâches d'interaction. Cela a été évalué indirectement en mesurant la diminution de force de poussée maximale en inhibant la contribution des termes de rigidité rotationnelle à la stabilisation d'une tige pivotante. Les résultats démontrent que sans la rigidité rotationnelle, des pertes de l'ordre de 40% sont observées dans la force de poussée maximale. Par conséquent, la force de serrage peut jouer un rôle significatif dans la stabilisation des outils à main. Les expériences réalisées ont permis d'estimer les niveaux de rigidité moyens de 10 sujets à 16 Nm/rad (rigidité rotationnelle) et 230 N/m (rigidité translationnelle). Des variations importantes entre sujets démontrent l'importance de tenir compte des capacités de stabilisation des sujets dans la conception d'outils à main ou d'espaces de travail.

Les activités de recherche réalisées au cours de ce projet ont plusieurs applications pratiques en santé et sécurité au travail. Ils aideront à mieux diriger la conception de manches d'outils en maximisant l'efficacité de la rigidité rotationnelle de la main pour stabiliser les outils. Les études théoriques ont mis en lumière les faiblesses des systèmes de caractérisation de la force de serrage actuels. Les expériences réalisées ont clairement démontré que les cartes de capacités de poussée de sujets doivent être ajustées en fonction du niveau d'instabilité d'une tâche. En effet, des diminutions de l'ordre de 69% ont été enregistrées lorsque des instabilités statiques étaient présentes sous certaines conditions de contact main-outil. Étant donné que les capacités de stabilisation du membre supérieur varient significativement en fonction de sa configuration, l'ajustement de ces cartes n'est donc pas une opération simple. Les études ont démontré d'une part une variabilité importante de capacité de stabilisation des sujets étudiés. Cette variabilité pourrait être une source d'information importante pour expliquer l'origine des maladies occupationnelles. D'autre part, il a été clairement démontré que des sujets pouvaient utiliser une technique de stabilisation plutôt qu'une autre pour une même utilisation d'outil. Ces différences pourraient expliquer la variabilité des maladies observées pour une tâche donnée. Bien que les résultats de cette étude soient obtenus d'une étude sur la production d'une force sur une tige pivotante, des concepts généralisables au contrôle de plusieurs autres outils ont été identifiés.

Les concepts de mesure de force de serrage et de stabilisation d'objets sont directement applicables à d'autres domaines tels les abattoirs (stabilisation du couteau), les industries du textile (stabilisation des tissus pour la couture), les industries d'assemblage pour la manipulation et le montage de composantes.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	1
1.1. Définition de la problématique du projet de recherche	1
1.2. Objectifs spécifiques du projet de recherche	3
2. RAPPEL DES OBJECTIFS DE RECHERCHE SPÉCIFIQUES INITIAUX	4
3. ÉTUDE DE LA CORRÉLATION ENTRE FORCE DE SERRAGE ET INSTABILITÉ STATIQUE	5
3.1. Objectifs spécifiques	5
3.2. Conception et fabrication des dynamomètres	5
3.3. Validation des dynamomètres	8
3.3.1. Méthodes	8
3.3.2. Résultats	8
3.4. Validation de la mesure de la force de serrage	9
3.5. Étude de l'orientation de la force de serrage	11
3.6. Étude expérimentale sur la force de serrage lors d'une tâche avec instabilité statique	12
3.6.1. Résultats	12
3.7. Conclusions sur la question 1	13
4. ÉTUDE DU RÔLE DE LA FORCE DE SERRAGE DANS L'ÉTABLISSEMENT DE LA RIGIDITÉ DE LA MAIN.	13
4.1. Objectif spécifique	13
4.2. Rigidité rotationnelle versus rigidité translationnelle de la main	13
4.3. Rôle de la force de serrage pour établir la rigidité de la main	14
4.3.1. Influence de la force de serrage sur les termes de rigidité translationnelle	14
4.3.2. Influence de la force de serrage sur les termes de rigidité rotationnelle	15
4.4. Conclusions sur le rôle de la force de serrage pour établir la rigidité de la main	16
5. ÉTUDE DU RÔLE POTENTIEL DE LA RIGIDITÉ ROTATIONNELLE DE LA MAIN SUR SA FONCTION STABILISATRICE	16
5.1. Objectifs spécifiques	16

5.2.	Expérience 1 : Contribution relative des termes de rigidités de la main dans la stabilisation d'une tâche de poussée sur tige pivotante	17
5.3.	Expérience 2 : Estimation des niveaux maximums de certains termes de rigidité de la main dans la stabilisation de tâches d'interaction	17
5.4.	Rôle potentiel de la rigidité rotationnelle pour des tâches sub-maximales	17
6.	DISCUSSION ET CONCLUSIONS	19
7.	APPLICABILITÉ DES RÉSULTATS	20
8.	RETOMBÉES ÉVENTUELLES	21
9.	PUBLICATIONS ISSUES DU PROJET DE RECHERCHE	22
10.	RÉFÉRENCES	23
11.	ANNEXES	25

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Tâche étudiée au cours de l'étude: production d'une force sur une tige pivotante munie d'un manche d'outil.	3
Figure 2	Cas le plus simple d'une force de serrage: deux forces co-linéaires et opposées. Exemple : serrage d'un cylindre entre deux doigts.....	6
Figure 3	Cas plus réaliste de la force de serrage: une distribution de force normale à la surface du manche en plus de forces tangentielles (non illustrées) dues au frottement. Exemple : prise de puissance d'un manche d'outil.....	6
Figure 4	Projections des forces en axial (à gauche) ou en transverse (à droite).....	7
Figure 5	Dynamomètres conçus et fabriqués en vue des études expérimentales. A gauche : dynamomètre pour mesure de force axiale; à droite : les deux dynamomètres, celui pour mesure de force transverse étant sur la gauche.....	7
Figure 6	Schéma du modèle simplifié d'un doigt de la main humaine pour une prise de précision. Les composantes suivantes sont incluses dans le modèle : (1) tendon extenseur central, (2) tendon du FCP, (3) tendon du FCS, (4) interosseux, (5) lumbricaux, (6) bande latérale.	10
Figure 7	Système de référence pour représenter le mouvement relatif de la main versus la tige pivotante.....	14
Figure 8	Vue en coupe RMN de la main d'un sujet qui serre un cylindre.	16
Figure 9	Palonnier instrumenté à deux degrés de liberté pour mesurer les différents termes de rigidité de la main en fonction du niveau de force de poussée.	18

1. Introduction

1.1. Définition de la problématique du projet de recherche

L'utilisation d'outils à main mécaniques tels les perceuses, les riveteuses, les marteaux-piqueurs etc., constituent un danger potentiel pour les travailleurs en industrie. En effet, il semble reconnu que ces outils peuvent causer différentes atteintes du système neuro-musculo-squelettique tels le syndrome des vibrations (NIOSH, 1989; Brammer *et al*, 1982) et le syndrome du canal carpien (Cannon *et al*, 1981). Différentes approches peuvent être prises pour éviter de développer de tels troubles. Par exemple, comme plusieurs chercheurs ont fait par le passé, on peut tenter d'étudier différents paramètres sur le terrain pour ensuite corrélés ceux-ci avec les atteintes identifiées chez les travailleurs. Cette approche peut être très efficace dans certains cas, mais pas nécessairement dans tous les cas car,

- il est souvent très difficile de s'assurer que tous les paramètres "concernés" sont mesurés: par exemple, caractériser l'utilisation d'un outil à main ne requière pas seulement la connaissance des forces transmises à l'outil mais, aussi, la connaissance de l'impédance mécanique de la main utilisée pour le contrôle de l'outil, la posture du membre supérieur ainsi que l'activation musculaire de tous les muscles du membre, la condition physique de l'individu etc.; et
- étant donné la période latente importante de certains symptômes, il devient difficile de bien cerner la relation cause à effet.

Les études sur le terrain ont fourni des informations utiles pour améliorer la protection des travailleurs (e.g. document du NIOSH) mais il demeure que les informations obtenues pour l'utilisation d'un outil en particulier ne sont pas nécessairement généralisables à d'autres outils et ainsi, on ne peut prédire le danger potentiel d'une tâche pour un travailleur donné. Cette difficulté provient du fait que nous ne connaissons pas encore précisément l'étiologie de plusieurs maladies du système neuro-musculo-squelettique et que les facteurs de risques d'une tâche sont souvent évalués empiriquement.

Ces lacunes peuvent être partiellement éliminées en étudiant des aspects fondamentaux du contrôle moteur humain lors de la manipulation d'outils à main. Par exemple, si nous pouvions caractériser comment chaque individu contrôle les outils à mains mécaniques, on pourrait observer des différences majeures qui expliqueraient possiblement que tous les utilisateurs d'un même outil à main ne souffriront pas nécessairement des mêmes troubles du système neuro-musculo-squelettique. Or, à l'heure actuelle, les connaissances en contrôle moteur sur l'utilisation d'outils à main sont encore très peu développées.

Grâce à une subvention de l'IRSST (94-110), notre groupe de recherche a contribué à augmenter ces connaissances en étudiant la fonction stabilisatrice du membre supérieur. Nous avons investigué sa fonction stabilisatrice car nous croyons qu'elle représente un facteur important dans la demande musculaire d'une tâche. En effet, la fonction du membre supérieur n'est pas seulement d'appliquer des forces sur un outil mais, aussi, de le stabiliser dynamiquement, face à la présence de perturbations/instabilités dynamiques de l'environnement, ou statiquement, face à des instabilités statiques inhérentes à la tâche. L'effet stabilisateur du membre supérieur provient en partie de son impédance mécanique (rigidité, viscosité et inertie s'il est modélisé par

un système linéaire) induite par les propriétés mécaniques intrinsèques des muscles ainsi que des boucles réflexes (Winters et al., 1988). Ce rôle stabilisateur a été premièrement reconnu dans les travaux de Hogan (1984).

Il a été démontré que l'impédance mécanique du membre supérieur de sujets humains peut être modulée volontairement par la co-contraction musculaire et la posture (Mussa-Ivaldi et al., 1985; Tsuji et al., 1995). Étant donné une tâche d'interaction à réaliser, chaque sujet humain peut ainsi choisir une impédance mécanique différente. Une plus grande impédance mécanique, ou rigidité par exemple, induit des contraintes mécaniques plus élevées dans les tissus, sans nécessairement augmenter les forces d'interaction avec l'outil. L'évaluation biomécanique d'un poste de travail doit donc à la fois inclure l'étude des forces produites et de l'impédance mécanique utilisée par les sujets lors de l'exécution de la tâche. À l'heure actuelle, il n'est pas encore bien connu comment les sujets humains sélectionnent le niveau d'impédance mécanique du membre supérieur en fonction de la tâche à exécuter et surtout, comment ils réalisent cette impédance mécanique car le membre supérieur est un système mécanique à multi-degrés de liberté.

Au cours de ce projet de recherche, nous avons investigué cette question dans un cas précis. Nous avons analysé le rôle stabilisateur de la main lors de la production d'une force de poussée sur une tige pivotante (cf. Figure 1). L'étude de stabilisation s'est restreinte aux effets des instabilités statiques car celles-ci peuvent être assez bien contrôlées dans un contexte expérimental. Il en est généralement autrement dans le cas de perturbations dynamiques. Le type d'instabilité statique créé par la force de poussée se retrouve en partie dans plusieurs situations de contrôle d'outils à main telle une perceuse ou des riveteurs. Lors de l'opération d'un tel outil, une rigidité minimale de la main doit être produite afin de stabiliser l'outil. L'utilisateur peut tirer avantage de la rigidité translationnelle apparente de la main pour établir cette rigidité minimale (Rancourt et Hogan, 2001). Par contre, il peut être mécaniquement plus avantageux d'utiliser la rigidité rotationnelle de la main pour stabiliser l'outil (Rancourt et Hogan, 2001).

Le choix d'une technique de stabilisation plutôt qu'une autre peut avoir des conséquences importantes au niveau physiologique. En effet, si la rigidité translationnelle est plutôt utilisée, celle-ci sera établie en co-contraction des muscles qui rigidifient les articulations de l'épaule, du coude et du poignet. Par contre, si la rigidité rotationnelle est préférentiellement utilisée, les muscles participant à la force de serrage de l'outil pourraient être aussi impliqués afin d'établir une rigidité rotationnelle suffisante à l'interface outil-main. L'augmentation de la force de serrage pour aider à la stabilisation peut être défavorable pour la santé du travailleur car c'est un facteur susceptible d'être relié au syndrome du canal carpien et des maladies vibratoires. Elle augmente en effet la pression dans le canal carpien (Loslever et al, 1993) et modifie l'impédance mécanique de la main qui détermine en partie le niveau de transmission des vibrations des outils vers la main.

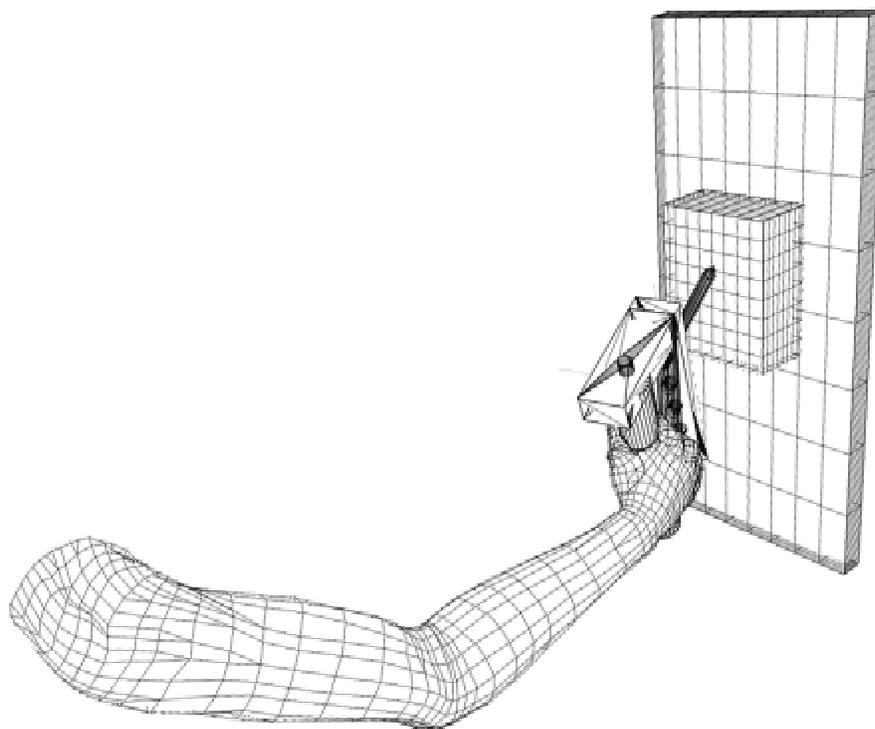


Figure 1 Tâche étudiée au cours de l'étude: production d'une force sur une tige pivotante munie d'un manche d'outil.

Il est évident que le niveau de force de serrage utilisé lors de la manipulation d'outils à main dépend de plusieurs facteurs, dont le poids de l'outil, la perception du danger de réaliser une tâche, la grosseur du manche de l'outil, le type de tâche à réaliser, le coefficient de frottement manche-main etc. Au cours du projet de recherche, nous avons déterminé si la force de serrage était aussi reliée au niveau d'instabilité statique de la tâche.

1.2. Objectifs spécifiques du projet de recherche

Au cours du projet de recherche, des études théoriques et expérimentales ont été réalisées afin d'établir le lien entre instabilité statique et force de serrage. Ces études avaient pour but de répondre à trois questions d'intérêt. La première question s'attaque directement au sujet du projet:

1. Est-ce que la force de serrage augmente avec une augmentation de l'instabilité statique dans une tâche de contact?

Les résultats expérimentaux obtenus suggèrent effectivement un tel comportement. Nous avons donc poursuivi le projet en réalisant des études théoriques pour répondre à la deuxième question:

2. De quelle façon la force de serrage peut être reliée à l'établissement de la rigidité de la main?

Les études démontrent clairement le rôle majeur que peut jouer la force de serrage dans l'établissement de la rigidité rotationnelle de la main. Ainsi, le potentiel de stabilisation par la rigidité rotationnelle prend une importance significative et nous avons donc étudié expérimentalement une troisième question:

3. Est-ce que la rigidité rotationnelle de la main a un rôle important pour stabiliser les tâches d'interaction?

2. Rappel des objectifs de recherche spécifiques initiaux

Initialement, la question principale du projet de recherche consistait à déterminer si la force de serrage est réellement corrélée à l'instabilité statique de l'outil. Des objectifs spécifiques découlaient de ce projet:

1. concevoir et construire un dynamomètre pour mesurer la force de serrage;
2. valider la mesure de la force de serrage;
3. étudier l'influence de l'instabilité statique sur la force de serrage; et
4. établir un modèle mécanique de la force de serrage pour analyser les résultats expérimentaux.

D'autres objectifs plus secondaires avaient aussi été énoncés:

5. Déterminer l'orientation de la force de serrage sur un manche;
6. Analyser l'à-propos de déterminer un manche optimal;
7. Étudier l'effet de la présence d'une gâchette sur la force de serrage;
8. Déterminer les différentes distributions de forces possibles sur un manche d'outil;
9. Établir un modèle mécanique du doigt pour relier les distributions de forces aux forces dans les tendons des muscles fléchisseurs et extenseurs des doigts lors de la prise d'un manche;
10. Établir un modèle mécanique du doigt pour relier l'action des tendons des muscles du doigt à l'établissement de la rigidité rotationnelle de la main; et
11. Déterminer l'importance de chacun des doigts de la main dans l'établissement de la rigidité rotationnelle de la main.

Au cours des travaux qui ont été menés pour investiguer les trois questions présentées à la section 1.2, tous ces objectifs ont été étudiés, plus particulièrement les cinq premiers.

3. Étude de la corrélation entre force de serrage et instabilité statique

3.1. Objectifs spécifiques

Cette section présente les études qui ont été réalisées afin de répondre à la première question de recherche du projet i.e. Est-ce que la force de serrage augmente avec une augmentation de l'instabilité statique dans une tâche de contact? Les études spécifiques qui ont été réalisées sont:

1. la conception et fabrication des dynamomètres pour mesurer la force de serrage;
2. la validation des dynamomètres fabriqués;
3. l'étude de l'orientation de la force de serrage sur un manche d'outil;
4. la validation de la mesure de la force de serrage; et
5. la réalisation d'une étude expérimentale pour étudier la variation de la force de serrage lors d'une tâche avec instabilité statique chez un certain nombre de sujets.

3.2. Conception et fabrication des dynamomètres

La problématique de la mesure de la force de serrage ainsi qu'une revue de littérature est présentée dans le mémoire de maîtrise de Claude Dubé (1996), chapitre 2. Ce mémoire est fourni à l'Annexe I du rapport. Brièvement, le problème réside dans le fait que le terme "force de serrage" n'est pas bien défini. La force de serrage est un concept bien accepté lorsque deux forces en opposition seulement sont produites sur un objet. Ces deux forces doivent être colinéaires et de même grandeur afin de maintenir le manche en équilibre, tel qu'illustré à la Figure 2. C'est le cas d'une prise de précision avec le pouce et l'index. Cependant, dans la prise de puissance d'un manche d'outil, nous sommes plutôt en présence d'une distribution de force sur toute la surface du manche, tel qu'illustré à la Figure 3 et le concept de force de serrage précédent n'est plus valide. La caractérisation de l'interaction entre la main et le manche ne sera complète que si on mesure la distribution de pression sur toute la surface du manche normalement et tangentielllement à la surface. Plusieurs études utilisent des capteurs de pression distribués sur la surface du manche pour mesurer la force de serrage. Le problème est en fait beaucoup plus compliqué car une caractérisation complète nécessite aussi une mesure de la force tangentielle à la surface de contact entre la main et le manche.

Suite à une recherche des dynamomètres disponibles sur le marché et dans la littérature, nous n'avons pas trouvé de dynamomètre qui puisse mesurer à la fois la distribution de pression normale et tangentielle à la surface d'un manche. La distribution de pression seule peut se faire par l'entremise de matrices de capteurs de pression à la surface du manche mais des coûts très importants sont nécessaires si on désire avoir une mesure valide et fidèle. Une alternative souvent choisie est de ne mesurer que la projection des contraintes à la surface dans une seule direction à la fois. C'est l'approche que nous avons choisie pour la réalisation des dynamomètres qui ont été utilisés dans les études expérimentales. Nous avons par contre considéré que l'interaction main-manche pouvait être caractérisée adéquatement par deux mesures: la mesure de la force axiale et la mesure de la force transverse, toutes deux définies à la section 2.3 de Dubé (1996). En résumé, ces forces représentent les projections des contraintes de contact main-manche dans deux directions orthogonales (cf. Figure 4).

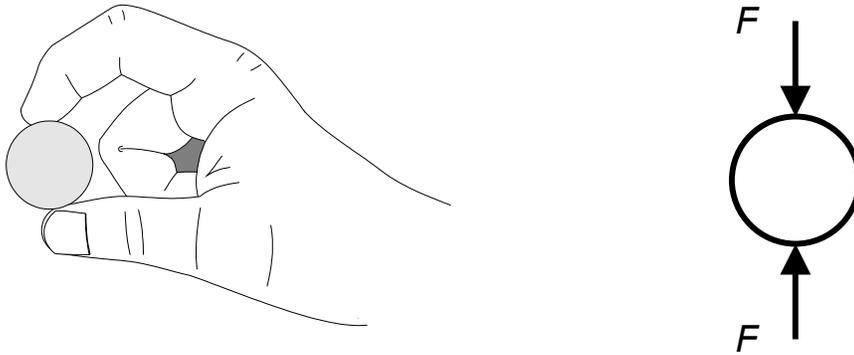


Figure 2 Cas le plus simple d'une force de serrage: deux forces co-linéaires et opposées. Exemple : serrage d'un cylindre entre deux doigts.

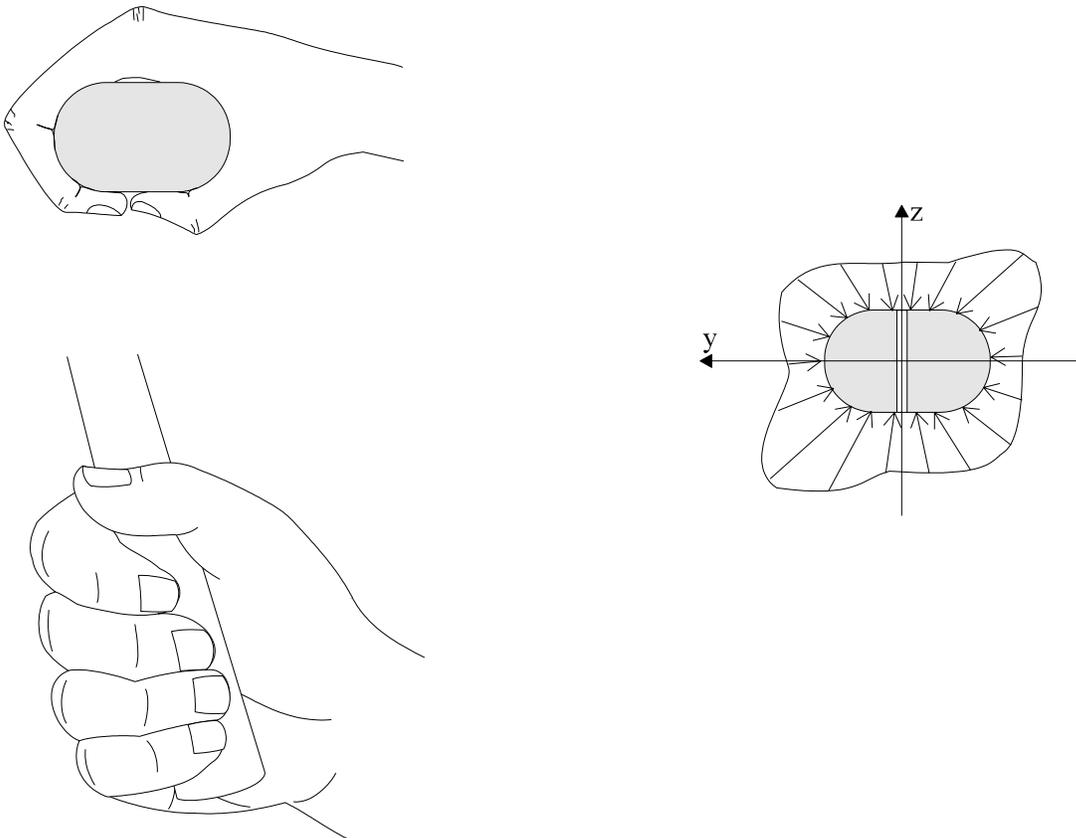


Figure 3 Cas plus réaliste de la force de serrage: une distribution de force normale à la surface du manche en plus de forces tangentielles (non illustrées) dues au frottement. Exemple : prise de puissance d'un manche d'outil.

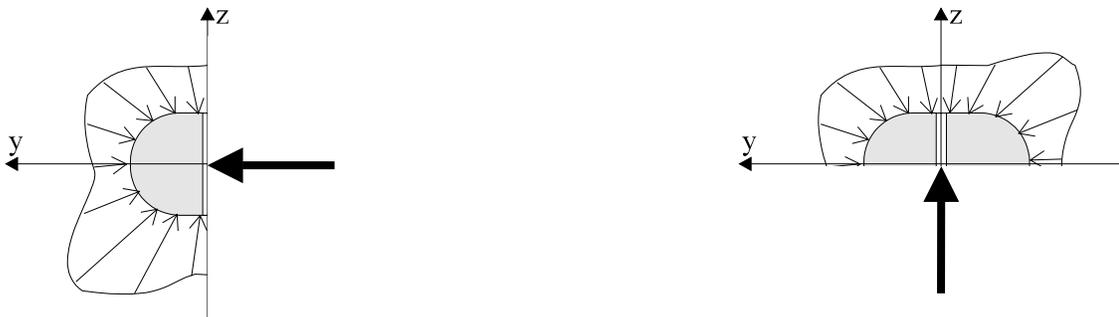


Figure 4 Projections des forces en axial (à gauche) ou en transverse (à droite).



Figure 5 Dynamomètres conçus et fabriqués en vue des études expérimentales. A gauche : dynamomètre pour mesure de force axiale; à droite : les deux dynamomètres, celui pour mesure de force transverse étant sur la gauche.

Deux dynamomètres ont été réalisés pour mesurer ces deux forces. La conception des dynamomètres a été réalisée en se basant sur les travaux de Pronk et Niesing (1981) et aussi de Radwin (1991). Ce type de dynamomètre permet de mesurer la force produite sur une poutre en porte-à-faux indépendamment du point d'application. Cela est possible en mesurant la force de cisaillement transmise dans la poutre au lieu de mesurer le moment de force produit à la surface. Les deux dynamomètres qui ont été conçus et fabriqués sont illustrés à la

Figure 5. Ceux-ci sont fabriqués à l'aide de jauges de contraintes standards. La conception des dynamomètres est décrite en détails au chapitre 3 et à l'Annexe V de Dubé (1996), document qui se retrouve à l'Annexe I de ce rapport.

3.3. Validation des dynamomètres

La technologie utilisée pour fabriquer les dynamomètres est similaire à celle utilisée dans la construction de cellules de force commerciales communément appelées “shear beam load cells”. Sur le marché, ces cellules de force sont annoncées comme ayant des précisions de l'ordre de 1% et, dépendamment des systèmes électroniques de traitement des signaux, peuvent aller jusqu'à 0,1%, mais à des coûts élevés. Une telle cellule de force aurait difficilement pu être utilisée pour notre application dû à ses dimensions importantes. D'autre part, nous voulions déterminer la faisabilité d'un manche instrumenté fabriqué maison et la qualité des signaux obtenus. En effet, les travaux de Pronk et Niesing ainsi que ceux de Radwin (1991) n'avaient pas fourni d'évaluation exhaustive de ce type de technologie. La validation des dynamomètres s'est faite à l'aide de différents tests expérimentaux. Une partie des tests a été publiée dans Dubé (1996, cf. Annexe I) tandis que des tests supplémentaires plus exhaustifs ont été réalisés par la suite.

3.3.1. Méthodes

Les problèmes pouvant être rencontrés avec ce type de dynamomètre sont multiples : (1) effets de température, (2) niveau de bruit du système de traitement des signaux, (3) influence du point d'application de la force, (4) induction de biais dû à des moments de torsion sur le manche, (5) induction de biais par des efforts orthogonaux, (6) dérive temporelle du signal, (7) temps de réponse du signal. Chaque facteur engendre des erreurs de niveau et de nature différents sur le signal de sortie des dynamomètres. Les erreurs totales ont été évaluées par une série des tests selon la méthodologie générale suivante :

- Le dynamomètre était fixé axialement par son extrémité supérieure à une tête rotative, munie d'un mandrin, dont l'axe de rotation était à l'horizontale;
- Des masses progressant entre 0,3 et 54 Kg ont été appliquées en 16 étapes successives, et ce pour différentes positions sur le manche (selon la longueur du manche, selon différentes positions hors de l'axe du manche, et à 90 degrés de l'axe de mesure pour déterminer l'influence des efforts orthogonaux à l'axe de mesure);
- La valeur du signal de sortie était ensuite enregistrée pour chaque masse déposée.

3.3.2. Résultats

D'une façon générale, on a observé les résultats suivants en tenant compte de toutes les erreurs provenant des facteurs mentionnés ci-haut :

- Pour des efforts supérieurs à 75 N, on observe des erreurs inférieures à 4%;
- Pour des efforts inférieurs à 75 N, on observe des erreurs supérieures à 4%, et ce, parce qu'il existe des biais absolus dans la mesure;
- Les deux dynamomètres présentent une bonne linéarité.

En pratique, puisque les niveaux de force de serrage sont généralement au-dessus de 75 N, on peut donc considérer que 4% est l'erreur maximale de mesure sur les deux dynamomètres. De meilleures performances pourraient être obtenues avec de meilleurs systèmes électroniques de traitement de signaux et l'ajout de jauges de contraintes pour la mesure du moment produit dans le cas d'une seule force appliquée. Ce cas est par contre rarement rencontré dans une situation de prise de puissance.

3.4. Validation de la mesure de la force de serrage

Il a été mentionné à la section 3.2 que la définition du terme force de serrage ou force de préhension n'était pas très explicite; ce terme porte à confusion car il est basé uniquement sur un cas trivial de deux forces en opposition sur un manche. Outre la prise de précision entre l'index et le pouce, le contact main-objet peut rarement se caractériser par deux forces opposées. On observe en général une distribution de pression autour de l'objet qui peut théoriquement varier d'une infinité de façons. On peut toutefois émettre l'hypothèse que pour une configuration et une fonction données de la main, il serait possible de quantifier le serrage d'un objet par une seule valeur scalaire. On suggère ici qu'il existerait une certaine synergie de contrôle neuromusculaire des doigts et de la main. Par exemple, le niveau d'activation musculaire de chacun des muscles qui participent au serrage pourrait être une simple relation linéaire avec la variable scalaire. En supposant une telle hypothèse, on peut envisager que la distribution de pression serait aussi constante mais son amplitude serait un multiple de la variable scalaire. Dans ce cas, une mesure du « niveau » de serrage pourrait être faite en utilisant uniquement une mesure par le dynamomètre axial ou transverse.

Un modèle statique d'un doigt a donc été élaboré afin de déterminer s'il peut effectivement exister, en première approximation, une relation linéaire entre force de serrage et niveau de force dans les tendons du doigt. La Figure 6 illustre le modèle mécanique du doigt qui a été utilisé pour le cas d'une prise de précision. Les muscles suivants ont été considérés : (1) fléchisseur commun superficiel (FCS), (2) fléchisseur commun profond (FCP), (3) lombricaux (LB), (4) extenseur commun (EC), et les (5) interosseux (INT). Les bandes latérales et le tendon extenseur central ont aussi été inclus. Deux cas différents ont été traités : un CAS 1 qui simule une prise de précision, où une force F seule est appliquée à la phalange distale 1 (cf. Figure 6), et un CAS 2 qui simule une prise de puissance, où une force est appliquée sur chacune des phalanges du doigt. Les forces de frottement sont négligées dans le modèle. Bien que celles-ci soient essentielles à l'équilibre statique du doigt dans une prise sur un objet, elles ne sont pas nécessaires pour expliquer les problématiques fondamentales de modélisation du doigt.

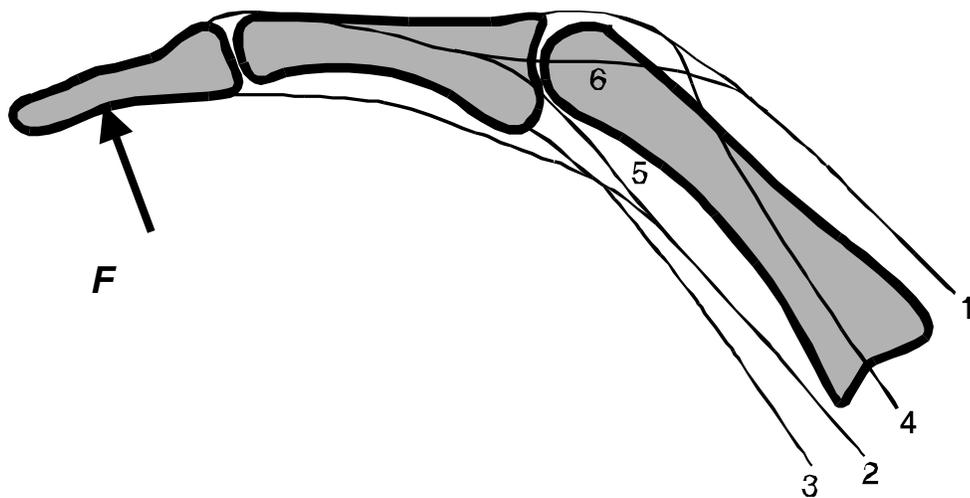


Figure 6 Schéma du modèle simplifié d'un doigt de la main humaine pour une prise de précision. Les composantes suivantes sont incluses dans le modèle : (1) tendon extenseur central, (2) tendon du FCP, (3) tendon du FCS, (4) interosseux, (5) lombricaux, (6) bande latérale.

Les valeurs des forces dans chacun des tendons peuvent être obtenues en établissant des équations d'équilibre pour chacune des phalanges. Le système d'équation obtenu peut alors être mis sous la forme matricielle

$$JF_{tendons}=RF \quad (1)$$

où J représente une matrice dont les éléments sont les bras de leviers des forces des tendons par rapport aux centres de rotation de chacune des articulations, $F_{tendons}$, le vecteur de forces recherchées dans les tendons, R est un vecteur de bras de leviers de la force F par rapport aux centres de rotation, et F est la force appliquée en extrémité du doigt. Puisque la matrice J n'est pas une matrice carrée et qu'il y a 6 inconnues (les 6 forces dans les tendons) et seulement 4

équations, on se retrouve donc avec un système sous-déterminé. Il y a donc une infinité de solutions possibles du vecteur $F_{tendons}$ a priori.

Cette indétermination peut être éliminée en trouvant des équations additionnelles qui permettent de relier les différentes forces des tendons ou des contraintes physiologiques telle le fait qu'un tendon ne peut produire une force négative. Une autre façon est d'optimiser une certaine fonction (e.g. la norme des efforts dans les tendons). Cependant, aucune étude n'a encore démontré qu'une fonction particulière arrivait à résoudre le problème de redondance dans les modèles musculaires du corps humain. Au cours de ce projet, nous n'avons pas été en mesure de déterminer des équations additionnelles ou une fonction d'optimisation qui nous aurait permis de résoudre le système d'équations. Le même problème se retrouve pour une prise de puissance. Le problème se complexifie encore plus si on ajoute des forces de frottement sur chacune des phalanges pour mieux représenter la réalité. En effet, puisqu'il n'y a pas glissement entre l'objet et le doigt, il n'existe pas de relation qui permet de relier la force de frottement et la force de contact normale.

Malgré cette problématique de sous-détermination, on remarque, à partir de l'équation 1, qu'il existe une relation linéaire entre les forces dans les tendons et la force exercée en extrémité du doigt. Par conséquent, pour une configuration donnée du doigt, si le ratio des forces dans les tendons demeure le même pour quel que niveau de force, on retrouve donc une force F qui varie proportionnellement à l'amplitude de force dans les tendons. Une telle situation se retrouve aussi pour le modèle d'une prise de puissance. Ainsi, on peut supposer que si la synergie musculaire demeure la même pour quel que niveau de force de serrage produite par la main, on ne devrait pas assister à un changement « directionnel » de force de serrage. D'une façon plus explicite pour la situation concernée ici, le ratio entre la force de serrage mesurée en transverse versus en axial resterait constant quel que soit le niveau de force de serrage. Ainsi, la mesure d'un seul dynamomètre suffirait à caractériser le niveau de force de serrage en autant que la synergie musculaire ne change pas en fonction du niveau de force de serrage.

3.5. Étude de l'orientation de la force de serrage

Radwin (1991), lors de tests expérimentaux sur la force de serrage de manches d'outils, mentionnait que la force de serrage était principalement dirigée selon la direction axiale et que seul un dynamomètre axial était utile. Nous avons vérifié cette hypothèse afin de déterminer si l'utilisation du dynamomètre axial était plus appropriée que le transverse. Les détails du protocole expérimental et des résultats sont présentés à la section 5.1 de Dubé (1996). Les résultats publiés sont présentés à l'Annexe IV de ce présent rapport de recherche. Brièvement, l'expérience consistait à demander à des sujets (21 sujets, 16 hommes) de serrer chacun des deux dynamomètres à tour de rôle avec la main, en produisant leur "force de serrage" maximale entre les différents sujets. Les résultats ont démontré que le ratio Force transverse/Force axiale variait entre 0,3 et 1,2. Ces variations sont évidemment en partie dues d'une part, à ce que les manches avaient une géométrie fixe tandis que les mains des sujets étaient de dimensions variables, et d'autre part, à ce que la position des mains des sujets n'était pas prescrite. De plus, ces résultats ne sont valides que pour la production d'une force de serrage maximale. L'utilisation des deux dynamomètres semble donc appropriée afin de mieux décrire le comportement des sujets lors d'une prise de puissance sur un manche d'outil. Cette étude de directionnalité de force de serrage a aussi été faite pour un manche muni d'une gâchette à l'index pour trois sujets. Des ratios de forces de serrage variant entre 0,28 et 0,69 ont été enregistrés. Contrairement à la

suggestion de Seoungyeon (1993), la présence d'une gâchette n'assure pas une force de serrage axiale seulement.

Le modèle statique de la force de serrage établi dans la section précédente nous permet de comprendre l'origine de ces variations. D'une part, des variations proviennent du fait que la synergie musculaire peut varier d'un sujet à l'autre, d'un test à l'autre et en fonction du temps (ce qui est équivalent à un changement dans le ratio des composantes du vecteur de forces des tendons utilisé dans le modèle). D'autre part, des variations sont aussi reliées aux changements de positionnement de la main par rapport au dynamomètre. Puisque ces deux variables ne peuvent être contrôlées pendant une expérience, on doit faire très attention de conclure à partir de mesures de variations de la force de serrage obtenues à l'aide d'un dynamomètre uniaxial seulement.

3.6. Étude expérimentale sur la force de serrage lors d'une tâche avec instabilité statique

L'objectif principal de ce projet de recherche était de déterminer l'influence de l'instabilité statique sur la force de serrage. L'hypothèse sous-jacente était que la force de serrage servirait à moduler la rigidité de la main qui est nécessaire pour stabiliser les outils à main. Le chapitre 4 décrit avec plus de détails la relation potentielle entre force de serrage et rigidité de la main. Dans cette section, nous avons voulu déterminer premièrement si on pouvait faire un lien entre la force de serrage et le niveau d'instabilité statique d'une tâche de contact. Nous avons choisi la tâche de poussée sur une tige pivotante. Cette tâche a été analysée théoriquement par Rancourt et Hogan (2001). Brièvement, en poussant sur une tige inversée, tel qu'illustré à la Figure 1, la force de poussée induit une instabilité statique qui doit être compensée par la rigidité de la main. Le niveau d'instabilité dépend de la longueur de la tige et du niveau de force de poussée. En variant ces deux paramètres, il est donc possible de déterminer si l'instabilité statique influence la force de serrage en mesurant cette force à l'aide des dynamomètres axial et transverse. Une expérience a donc été menée suivant cette approche, auprès de huit sujets (6 hommes). Le protocole d'étude est détaillé au chapitre 5 de Dubé (1996).

3.6.1. Résultats

Les corrélations obtenues entre la force de serrage et la force de poussée sont généralement de 0,9 et plus pour les différentes conditions expérimentales étudiées. Une telle corrélation était envisageable étant donné que si la force de poussée ne passe pas nécessairement par la tige, elle induit un moment déstabilisant directement proportionnel à la force de poussée. Cette situation était évidente dans le cas où le manche était décentré par rapport à la tige. Ce biais expérimental a été minimisé par la suite en utilisant un manche centré sur la tige. Des indices de corrélations similaires ont été obtenus. Par conséquent, il est très probable que le niveau de force de serrage soit en partie lié à un besoin d'augmenter la rigidité de la main en fonction de la force de poussée. D'autres études secondaires ont été réalisées (présence d'une gâchette, manche centré ou décentré, etc.) mais celles-ci ne sont pas discutées ici. Elles peuvent être consultées dans Dubé (1996).

3.7. Conclusions sur la question 1

Cette première expérience était une expérience préliminaire qui a été faite sur un nombre restreint de sujets. Une corrélation évidente a été établie entre la force de poussée et la force de serrage. Cette corrélation est physiquement explicable en partie parce que la force de poussée induisait un moment déstabilisant important sur la tige, même si la force était parallèle à l'axe de la tige pivotante. Des conditions expérimentales particulières ont par contre démontré qu'il existerait tout de même une certaine corrélation entre la force de serrage et le niveau de rigidité de la main nécessaire pour compenser l'instabilité statique. Étant donné les limites du montage expérimental utilisé, nous n'avons pas poursuivi les études avec ce type d'expérience.

4. Étude du rôle de la force de serrage dans l'établissement de la rigidité de la main.

4.1. Objectif spécifique

La deuxième question principale du projet de recherche visait à déterminer le rôle de la force de serrage dans l'établissement de la rigidité de la main car cette dernière doit être modulée afin de compenser pour l'instabilité de la tâche. Cette question a été abordée en définissant premièrement les différents types de rigidités en cause, puis en analysant théoriquement de quelle façon la force de serrage peut influencer ces rigidités.

4.2. Rigidité rotationnelle versus rigidité translationnelle de la main

Premièrement, il est important de définir ce qu'on entend par rigidité de la main. Par rigidité, on entend la propriété de la main à produire une force de résistance suite à un déplacement "statique" effectué par l'environnement. En pratique, on veut ainsi modéliser la caractéristique mécanique de la main par un ressort à multi-degrés de liberté. D'une façon macroscopique, on peut en effet caractériser que le lien entre la main et un outil est un simple nœud. Bien que cette approche soit très simplificatrice, elle permet de mieux comprendre l'effet de la force de serrage sur la rigidité de la main. Grâce à cette simplification, on peut caractériser les propriétés mécaniques « linéaires » statiques du nœud par une matrice de rigidité \mathbf{K} donnée par :

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} & K_{x\zeta} & K_{x\psi} & K_{x\varphi} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} & K_{y\zeta} & K_{y\psi} & K_{y\varphi} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} & K_{z\zeta} & K_{z\psi} & K_{z\varphi} \\ K_{\zeta x} & K_{\zeta y} & K_{\zeta z} & K_{\zeta\zeta} & K_{\zeta\psi} & K_{\zeta\varphi} \\ K_{\psi x} & K_{\psi y} & K_{\psi z} & K_{\psi\zeta} & K_{\psi\psi} & K_{\psi\varphi} \\ K_{\varphi x} & K_{\varphi y} & K_{\varphi z} & K_{\varphi\zeta} & K_{\varphi\psi} & K_{\varphi\varphi} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

où le vecteur $\mathbf{q} = [x \ y \ z \ \zeta \ \psi \ \varphi]$ représente le vecteur de déplacement relatif (« simplifié ») entre la main et le manche (Rancourt et Hogan, 2001). Les différents déplacements en rotation de la main sont illustrés à la

Figure 7. C'est cette matrice de rigidité qui fait que la tige pivotante, comme tout outil à main, peut être statiquement stabilisée. En modifiant la configuration du membre supérieur (angles à chacune des articulations), la configuration des doigts sur le manche et l'activation musculaire des muscles intrinsèques et extrinsèques au membre supérieur, un utilisateur peut moduler les 36 paramètres de la matrice \mathbf{K} . Ces 36 paramètres peuvent se subdiviser en trois groupes : les

rigidités translationnelles (sous-matrice supérieure gauche), les rigidités rotationnelles (sous-matrice inférieure droite) et les rigidités mixtes (i.e. tous les autres termes).

Chaque terme de rigidité de la matrice \mathbf{K} peut participer à l'établissement de la rigidité de la main. Selon la tâche qui est effectuée, certains seront plus importants que d'autres pour la stabilisation de la tâche.

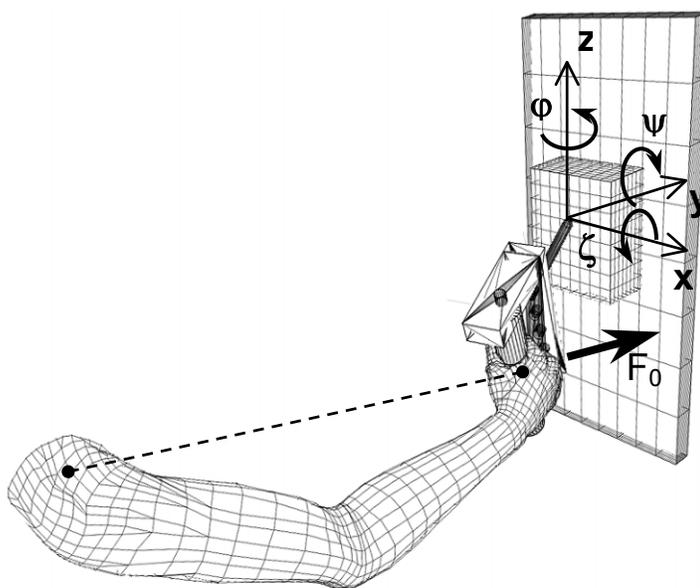


Figure 7 Système de référence pour représenter le mouvement relatif de la main versus la tige pivotante.

4.3. Rôle de la force de serrage pour établir la rigidité de la main

L'influence de la force de serrage sur la rigidité de la main a été analysée théoriquement. Selon les termes de rigidité en cause, la force de serrage influencera leur valeur selon des processus différents.

4.3.1. Influence de la force de serrage sur les termes de rigidité translationnelle

Dans une prise de puissance sur un manche, les termes de rigidité translationnelle dépendent principalement des rigidités aux articulations du membre supérieur, notamment, au poignet, au coude et à l'épaule. Pour un modèle planaire d'un manipulateur à trois segments, il est bien connu que la relation entre la sous-matrice de rigidité translationnelle \mathbf{K}_r et les rigidités aux articulations \mathbf{K}_{ar} est donnée par :

$$\mathbf{K}_{ar} = \mathbf{J}^T \mathbf{K}_r \mathbf{J} \quad (3)$$

Les muscles qui participent à la force de serrage ont une influence directe sur les grandeurs des rigidités aux articulations, en particulier le poignet. En effet, puisque la rigidité d'un muscle augmente avec son activation musculaire, tous les fléchisseurs et les extenseurs des doigts augmenteront sa rigidité lorsque la force de serrage augmentera. De même, les rigidités du coude et de l'épaule augmenteront en synergie car l'origine de certains des fléchisseurs et

extenseurs se retrouve à l'humérus et ceux-ci forceront des muscles plus proximaux (qui agissent au niveau du coude et/ou de l'épaule) à compenser pour les efforts supplémentaires induits. La variation de la rigidité du poignet a par contre un effet beaucoup moindre sur la rigidité translationnelle que les rigidités du coude et de l'épaule, dû à sa position plus distale. À notre connaissance, la variation de rigidité des articulations du membre supérieur en fonction de la force de serrage n'est pas connue et elle n'a pas été investiguée dans ce projet de recherche.

4.3.2. Influence de la force de serrage sur les termes de rigidité rotationnelle

L'influence de la force de serrage sur la rigidité rotationnelle de la main est un sujet beaucoup plus nouveau et n'a pas fait l'objet d'études antérieures à notre connaissance. Les termes de rigidité rotationnelle ont pour fonction de limiter la rotation du manche dans la main. Initialement, nous avons tenté de relier la rotation d'un manche dans la main et de déterminer les variations de configuration des doigts qui en résulte. Connaissant ces variations, il serait potentiellement possible de déterminer les forces d'interaction des doigts avec le manche par l'intermédiaire des valeurs de rigidités des doigts. Cependant, cette approche s'est avérée très complexe car elle implique une connaissance de la configuration de contact entre la main et le manche qui peut être de géométrie très variable, et une connaissance des rigidités des doigts en différentes positions, données encore inexistantes. Il est évident toutefois que ce phénomène d'interaction doigts-manche peut être influencé par la force de serrage qui affecte directement les niveaux de rigidité des doigts et par conséquent, les termes de rigidités rotationnelles.

Un deuxième phénomène, beaucoup plus simple, a été mis en lumière au cours du projet pour expliquer le lien entre force de serrage et niveau de rigidité de la main. C'est le fait qu'en augmentant la force de serrage, la peau des doigts et de la paume se retrouve plus compressée. Par conséquent, la rigidité de la peau en compression augmente tel qu'observé dans les travaux de Serina et al. (1998). On peut supposer que la rigidité en cisaillement de la peau augmente de même avec la force de compression.

La rigidité en cisaillement de la peau est directement reliée à la rigidité rotationnelle $K_{\phi\phi}$ de l'interface main-outil lorsqu'il n'y a pas de glissement à l'interface. Ceci est facilement compréhensible si on analyse la rotation d'un manche cylindrique dans la main d'un sujet. Des tests préliminaires ont été effectués sur une machine RMN à l'Hôpital St-François D'Assise à Québec où un sujet tenait un cylindre en plastique dans sa main et une vue en coupe de la main a été prise (cf. Figure 8). Le cylindre n'étant pas visible sur le scan, on l'a ajouté par la suite. On remarque facilement que si le cylindre subit une rotation dans la main, la configuration des doigts ne changera pas. Par conséquent, ce n'est pas par un processus de déformation de configuration des doigts que la main peut empêcher la rotation du cylindre. La rotation est plutôt limitée par la résistance au cisaillement de la peau des doigts et de la main. S'il n'y a pas de glissement entre la peau et le cylindre, la peau sera cisailée lors de la rotation du cylindre dans la main. Plus la résistance au cisaillement de la peau sera élevée, plus la rigidité rotationnelle de la main sera donc élevée. Or, au cours de tests préliminaires effectués au cours de ce projet, il est apparu très clairement qu'à des faibles forces de serrage, la rigidité en cisaillement de la peau était très faible et qu'une force de serrage très importante était nécessaire pour l'augmenter significativement. Malgré l'importance de ce phénomène, nous n'avons pas été en mesure de compléter cette analyse au cours du projet de recherche. Nous avons par contre identifié un deuxième processus important par lequel la force de serrage peut affecter la rigidité rotationnelle de la main.

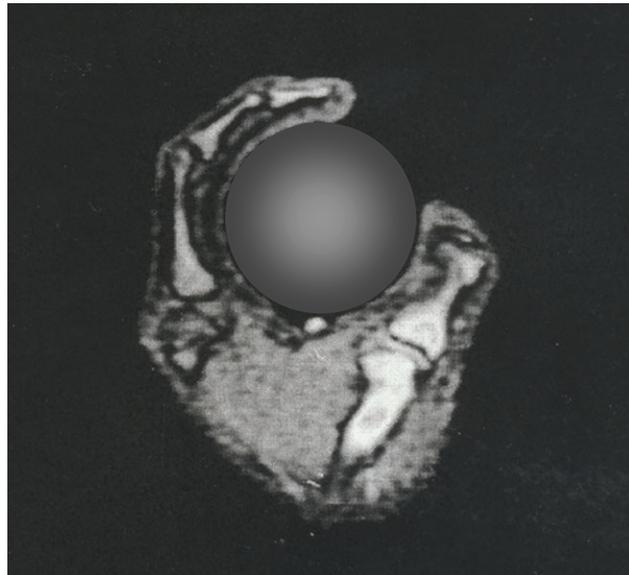


Figure 8 Vue en coupe RMN de la main d'un sujet qui serre un cylindre.

4.4. Conclusions sur le rôle de la force de serrage pour établir la rigidité de la main

À l'aide de modèles mécaniques simples, il a été expliqué comment la force de serrage peut affecter certains termes de rigidités de la main, plus spécifiquement la sous-matrice de rigidité K_{rr} et la rigidité $K_{\phi\phi}$. Un lien n'a pas été fait avec tous les termes mais on peut supposer en première approximation que les termes de rigidité possèdent une certaine synergie et que si certains termes augmentent, les autres aussi. Des études supplémentaires sont en cours pour clarifier le phénomène de résistance au cisaillement de la peau sur la capacité de stabilisation de la main. Ce phénomène pourrait être majeur dans l'établissement des termes de rigidités rotationnelles de la main.

5. Étude du rôle potentiel de la rigidité rotationnelle de la main sur sa fonction stabilisatrice

5.1. Objectifs spécifiques

Les études précédentes ont mis en lumière le fait que la force de serrage joue un rôle majeur dans l'établissement des termes de rigidité rotationnelle de la main. Si ces termes de rigidité sont importants dans la stabilisation des outils, cela entraînera donc une augmentation importante de la force de serrage, une situation apparemment non avantageuse pour la santé du travailleur. La dernière question principale qui a donc été investiguée dans ce projet était de déterminer

l'importance de la rigidité rotationnelle dans la tâche de poussée sur tige pivotante. Cette question a été analysée à l'aide de deux expériences. La première expérience a évalué la contribution relative de différents termes de rigidité en analysant les variations de forces de poussée maximales en fonction de différents types de tâches de poussée. La deuxième expérience a complété la première en estimant, à l'aide de modèles de stabilisation simplifiés, les grandeurs de deux termes de rigidité : les termes K_{xx} et $K_{\phi\phi}$. Les articles soumis pour publication relatifs à ces expériences se trouvent en Annexe II et III. Ces articles décrivent en détails la problématique, la méthodologie, les résultats et les discussions. Un bref résumé est fourni ci-dessous.

5.2. Expérience 1 : Contribution relative des termes de rigidités de la main dans la stabilisation d'une tâche de poussée sur tige pivotante

L'objectif de cette expérience était de déterminer indirectement le rôle stabilisateur des termes de rigidités de la main en mesurant la variation de la force maximale de poussée de sujets humains dans une tâche de poussée sur une tige pivotante. Des conditions expérimentales particulières étaient choisies afin de distinguer la contribution de chacun des termes pour la stabilisation de la tige. Le protocole détaillé de l'expérience est décrit à l'Annexe II. Les résultats ont démontré que la présence d'une instabilité statique réduisait la force de poussée maximale des sujets à un maximum de 52%. Cette baisse peut être attribuée au fait que les sujets auraient atteint leur capacité maximale de stabilisation pour un certain effort de poussée. De plus, en inhibant la contribution stabilisatrice de plusieurs termes de rigidités rotationnelles, la baisse de force de poussée allait jusqu'à 31%. Ces résultats démontrent que les termes de rigidités rotationnelles peuvent être aussi importants que ceux de rigidités translationnelles dans la stabilisation de la tige pivotante. Les résultats étant très variables d'un sujet à l'autre, il est donc probable que des différences de stratégies de stabilisation soient présentes d'un sujet à l'autre.

5.3. Expérience 2 : Estimation des niveaux maximums de certains termes de rigidité de la main dans la stabilisation de tâches d'interaction

L'objectif de cette expérience était de réaliser des tests qui nous permettraient d'estimer les niveaux de deux termes de rigidités de la main : les termes K_{xx} et $K_{\phi\phi}$. En utilisant les résultats des tests de la première expérience et ceux spécifiques à la deuxième, nous avons été en mesure de déterminer ces estimés à l'aide de modèles de stabilisation statique de chaque tâche expérimentée (cf. Annexe III). Ces différentes tâches sont toutes des tâches de poussée sur des systèmes mécaniques statiquement instables. Les résultats ont démontré une moyenne de 16 Nm/rad et de 230 N/m pour les mêmes dix sujets que la première expérience. Des variations importantes entre sujets démontrent l'importance de tenir compte des capacités de stabilisation des sujets dans la conception d'outils à main ou d'espaces de travail. Les estimés obtenues sont des valeurs minimales car elles sont obtenues de modèles de stabilisation minimale des tâches. Les résultats démontrent finalement que les sujets ont probablement utilisé la cocontraction musculaire afin de compenser pour les instabilités statiques induites par la force de poussée et éventuellement, pour augmenter la marge de stabilité au cours de l'exécution de la tâche.

5.4. Rôle potentiel de la rigidité rotationnelle pour des tâches sub-maximales

Les résultats des deux expériences précédentes démontrent clairement le rôle que peut jouer la rigidité rotationnelle dans la stabilisation d'outils à main. Toutefois, les résultats ont été obtenus au cours de tâches à forces maximales. La réalité est autre car les tâches sont souvent à niveau de force sub-maximale (50% et moins). Il y a donc un besoin de déterminer à quel niveau la

rigidité rotationnelle est utilisée et ce, en fonction du niveau de force de poussée et du sujet. Afin de mesurer la rigidité rotationnelle dans ces différentes conditions, nous avons conçu un palonnier à

deux degrés de liberté pour simuler une tâche de poussée sur tige pivotante (cf. Figure 9). Dans ce cas par contre, la tige est actionnée par deux moteurs et permet ainsi de mesurer les niveaux de rigidité translationnelle et rotationnelle en fonction du niveau de force de poussée. Malheureusement pour ce présent projet de recherche, le système n'a pu être complété dans les temps voulus. Des tests débiteront à l'automne prochain.

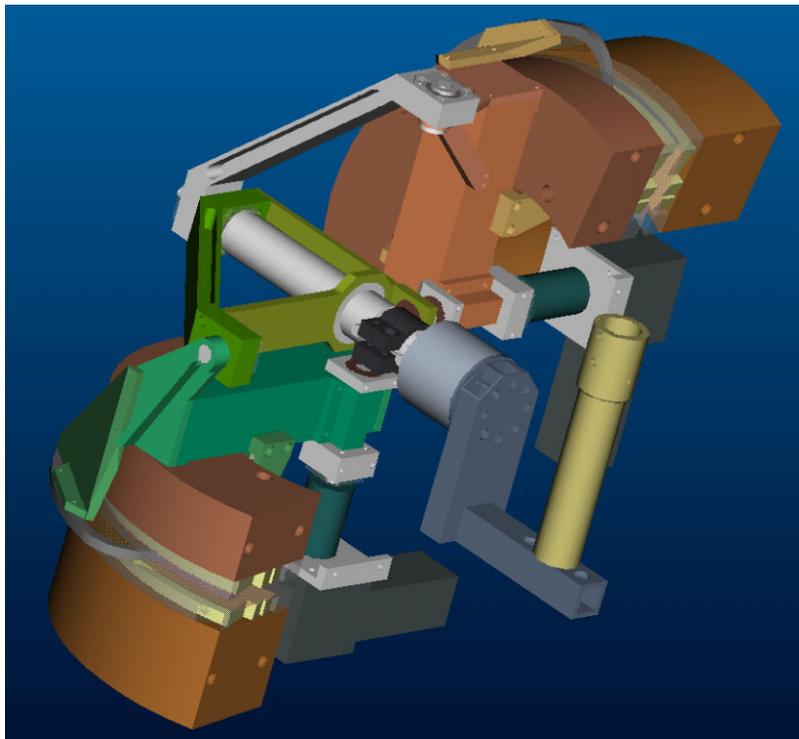


Figure 9 Palonnier instrumenté à deux degrés de liberté pour mesurer les différents termes de rigidité de la main en fonction du niveau de force de poussée.

6. Discussion et conclusions

Les objectifs spécifiques présentés lors de la demande de subvention et présentés dans la prochaine section, ont été atteints en majeure partie. Quelques objectifs n'ont pas été poursuivis étant donné certains changements de direction indiqués par les résultats obtenus au cours des expériences. Ces changements de direction ont initié des avenues de recherche particulièrement intéressantes que nous poursuivons présentement.

Le premier objectif du projet consistait à concevoir des dynamomètres pour mesurer la force de serrage. Le projet a permis d'atteindre ces objectifs et il a surtout permis de mieux identifier la problématique de caractérisation de cette « valeur » physique. La problématique se retrouve dans la caractérisation lors d'une prise de puissance et non lors d'une prise de précision. Des études supplémentaires sont nécessaires avant d'obtenir un instrument capable de « quantifier » la force de serrage d'une façon fiable et valide. Grâce à un modèle mécanique du doigt, des avenues ont été proposées mais elles supposent une constance dans la synergie musculaire qui doit être prouvée par des études. Toute étude doit faire attention aux interprétations lorsqu'elle tire des conclusions sur des variations de force de serrage en utilisant un dynamomètre uniaxial. Par exemple, on pourrait vouloir déterminer une grosseur de manche optimale en déterminant la grosseur pour laquelle la force de serrage serait maximale. Cette approche est a priori fautive car elle néglige le fait que le niveau de force de serrage peut varier seulement par une modification de la configuration des doigts et leur position relative par rapport au manche. Les expériences réalisées ont démontré que « l'orientation » de la force de serrage peut varier significativement d'un sujet à l'autre.

Une corrélation entre force de serrage et niveau d'instabilité statique lors d'une tâche de poussée sur une tige inversée a pu être identifiée. Cependant, ces résultats ont été obtenus sur un nombre restreint de sujets. Afin de mieux contrôler les paramètres expérimentaux, nous avons plutôt procédé par une approche indirecte comme étude finale. Celle-ci était possible car nous avons identifié de quelles façons la force de serrage peut affecter la rigidité de la main qui elle sert à stabiliser la tige inversée. Les expériences réalisées ont clairement démontré que la force de serrage peut jouer un rôle très important dans la stabilisation d'outils à main. Sans sa contribution, des pertes de capacités de stabilisation de l'ordre de 40% ont été mesurées. Des études sont en cours afin d'identifier sa contribution dans des tâches d'interaction avec production de forces sub-maximales. Les résultats des expériences ont aussi permis d'estimer les capacités de stabilisation des sujets. Les niveaux moyens de rigidité de la main mesurés sont de 16 Nm/rad et de 230 N/m.

Des études préliminaires ont été réalisées afin d'identifier l'influence de la présence d'une gâchette et d'un manche centré versus décentré sur la force de serrage. Les premiers résultats obtenus démontrent que la gâchette a pour effet d'augmenter le niveau de force de serrage, de même que le fait d'utiliser un manche décentré. Des études supplémentaires sont nécessaires afin de clarifier l'influence de ces deux variables sur la force de serrage.

Un modèle mécanique d'un doigt a été élaboré afin de mieux comprendre la problématique de caractérisation de la force de serrage. Ce modèle n'a pu être étudié d'une façon exhaustive afin de pouvoir relier les distributions de force sur un objet à la force dans les tendons. Des études de niveau contrôle moteur doivent être effectuées afin de finaliser le modèle.

7. Applicabilité des résultats

Les activités de recherche réalisées au cours de ce projet ont plusieurs applications pratiques en santé et sécurité au travail. Les trois domaines d'application les plus importants sont décrits ci-dessous.

Conception de manches d'outils

Les résultats obtenus ont démontré le rôle important que peut jouer la force de serrage dans la stabilisation des outils, en particulier, par son influence sur la rigidité de la peau en cisaillement. Par conséquent, les designs de manche d'outils devraient tenir compte de cet aspect souvent négligé. Par exemple, plusieurs manches sont maintenant recouverts de revêtement polymérique pour améliorer le coefficient de frottement peau-manche. Ce nouveau design est bénéfique pour réduire la force de serrage nécessaire pour éviter un glissement de l'outil. Cependant, ce revêtement n'améliore pas la rigidité de l'interface peau-manche. La même problématique se retrouve aussi lors de l'utilisation de gants. Ceux-ci peuvent être avantageux pour améliorer le frottement mais pas nécessairement pour l'aspect rigidité.

D'autre part, grâce à l'analyse du phénomène de force de serrage, il est clairement apparu que l'optimisation de la géométrie d'un manche, par exemple, ne peut se faire par une mesure unique de force de serrage axiale. Ces résultats permettront ainsi de mieux diriger les futures études d'optimisation de manches d'outils.

Malgré l'aspect préliminaire de certains résultats, le fait d'avoir un manche centré au lieu de décentré pour effectuer la tâche de poussée sur une tige a clairement mené à une baisse significative de la force de serrage chez tous les sujets. Cet aspect devrait être analysé en détail pour clarifier l'importance de l'utilisation de manches centrés.

Cartes de production de force

Les résultats sur les forces maximales de poussée ont clairement démontré que les cartes de capacités maximales de sujets doivent être utilisées avec précaution pour l'opération d'outils à main. En effet, ces cartes sont obtenues à partir de situations sans instabilité statique. Les résultats de ce présent projet ont démontré que des diminutions de l'ordre de 40% sont possibles selon certaines conditions expérimentales. Les cartes de capacité doivent donc être ajustées en tenant compte de l'aspect instabilité. Étant donné que les capacités de stabilisation du membre supérieur varient significativement en fonction de sa configuration, l'ajustement de ces cartes n'est donc pas une opération simple.

Études sur l'origine des maladies occupationnelles

Les études ont démontré une variabilité importante de capacité de stabilisation des sujets étudiés. Cette variabilité pourrait être une source d'information importante pour expliquer l'origine des maladies occupationnelles. D'autre part, il a été clairement démontré que des sujets pouvaient utiliser une technique de stabilisation plutôt qu'une autre pour une même utilisation d'outil. Ces différences pourraient expliquer la variabilité des maladies observées pour une tâche donnée.

La mesure de la force de serrage

Les études sur la mesure de la force de serrage ont permis de mieux identifier la problématique de caractérisation de cette quantité physique. Malgré le fait qu'une solution fiable et valide n'a pas été proposée, des avenues de développement ont été suggérées afin d'arriver à déterminer une méthode de caractérisation de la force de serrage.

Applications à d'autres outils

Les résultats obtenus dans ce projet proviennent d'une tâche d'interaction spécifique. Ces résultats ne sont pas nécessairement applicable directement à d'autres types de tâches d'interaction. Par contre, ils fournissent des pistes d'étude importantes pour analyser ces autres tâches.

8. Retombées éventuelles

Au niveau recherche

Ce projet de recherche a plusieurs retombées au niveau recherches futures. Premièrement, il a permis d'établir une infrastructure expérimentale pour poursuivre les recherches sur la stabilisation des outils à main mécaniques. Deuxièmement, il a permis d'établir des collaborations intéressantes avec le Liberty Mutual Research Center au Massachusetts, USA, dont les activités sont similaires l'IRSST, et le groupe de recherche au Michigan, dirigé par le Dr Radwin, qui s'intéresse particulièrement aux maladies occupationnelles. Ces collaborations s'intensifieront assurément dans le futur. Troisièmement, le projet a permis de poser les fondations à une meilleure compréhension du rôle de la main dans le contrôle des outils à main. Malgré la complexité du sujet, des études doivent être réalisées dans ce domaine. Les sujets de recherche qui seront poursuivis sont la caractérisation de la force de serrage, l'étude de la stabilisation d'outils à des niveaux de force submaximal et le rôle de la peau dans la stabilisation des outils.

Au niveau applications industrielles

Pour l'instant, les applications industrielles directes sont réduites. Le projet a permis au demandeur de prendre contact avec des ergonomes et des spécialistes en médecine du travail de la région qui amèneront assurément des applications industrielles dans un avenir proche. Les concepts de mesure de force de serrage et de stabilisation d'objets sont directement applicables à des domaines tels les abattoirs (stabilisation du couteau), les industries du textile (stabilisation des tissus pour la couture), les industries d'assemblage pour la manipulation et le montage de composantes.

9. Publications issues du projet de recherche

Les différentes publications issues de ce projet de recherche sont listées ci-dessous.

Dubé, C. (1996), Influence de l'instabilité statique sur la force de serrage des outils manuels. Mémoire de maîtrise, Département de génie mécanique, Université Laval.

Rancourt, D., Roy, P.-O. (2001) Estimation of maximum hand stiffness in the stabilization of force interactive tasks. Submitted to *J. Biomechanics*.

Roy, P.-O., Rancourt, D. (2001) Relative contribution of hand stiffness terms in the stabilization of the push on stick task. Submitted to *J. Biomechanics*.

Roy, P.-O., Étude des mécanismes de stabilisation d'une tâche de contact par le membre supérieur. Mémoire de maîtrise, Département de génie mécanique, Université Laval.

10. Références

NIOSH Publication No, 89-106 (1989) Occupational Exposure to Hand-Arm Vibration, 145p.

Brammer, A.J., Taylor, W. (1981) Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry : An Introduction and Review. *Proceedings of the International Symposium on Hand-Arm Vibration*, Ottawa, pp. 1-12.

Dubé, C. (1996), Influence de l'instabilité statique sur la force de serrage des outils manuels. Mémoire de maîtrise, Département de génie mécanique, Université Laval.

Cannon, L.J. Bernacki, E.J., Walter, S.D. (1981) Personal and occupational factors associated with carpal tunnel syndrome. *J. Occ. Med.*, **23**, 255-258.

Hogan, N. (1984) Adaptive Control of Mechanical Impedance by Coactivation of Antagonist Muscles. *IEEE Transactions on Automatic Control*. **AC-29** (8), 681-690.

Loslever, P. and Ranaivosoa, A., (1993) Biomechanical and epidemiological investigation of carpal tunnel syndrome at workplaces with high risk factors. *Ergonomics*, **36**(5), 537-554.

Mussa-Ivaldi, F.A., Hogan, N., And Bizzi E. (1985) Neural, Mechanical, and geometric factors subserving arm posture in humans. *J. Neurosci.* **5**(10), 2732-2743.

Pronk, C.N.A., Niesing, R., (1981) Measuring hand-grip force using a new application of strain gauges. *Med. & Biol. Eng. & Comput.*, **19**, 127-128.

Radwin, R.G., Masters, G.P., Lupton, F.W. (1991) A linear force-summing hand dynamometer independent of point of application. *Applied Ergonomics*, **22**(5), 339-345.

Rancourt, D. et Hogan, H. (2001) Stability in Force Production Tasks. In press in *J. Motor Behavior*.

Rancourt, D., Roy, P.-O. (2001) Estimation of maximum hand stiffness in the stabilization of force interactive tasks. Submitted to *J. Biomechanics*.

Roy, P.-O., Rancourt, D. (2001) Relative contribution of hand stiffness terms in the stabilization of the push on stick task. Submitted to *J. Biomechanics*.

Seoungyeon, O., Radwin, R.G. (1993) Piston Grip Power Tool Handle and Trigger Size Effects on Grip Exertions and Operator Preference. *Human Factors*, **35**(3):551-569.

Serina, E.R., Mockensturm, E., Mote Jr. C.D., Rempel, D. (1998) A structural model of the forced compression of the fingertip pulp. *J. Biomechanics*, **31**, 639-646.

Tsuji, T., Morasso, P.G., Goto, K. And Ito, K. (1995) Human hand impedance characteristics during maintained posture. *Bio Cybern.* **72**(6), 475-485.

Winters, J., Stark, L. and Seif-Naraghi, A.-H. (1988). An Analysis of the sources of musculoskeletal system impedance. *J. Biomechanics*, 21(12), pp. 1011-1025.

11. Annexes

- Annexe I Mémoire de maîtrise de Claude Dubé : Influence de l'instabilité statique sur la force de serrage des outils manuels.
- Annexe II Roy, P.-O., Rancourt, D. (2001) Relative contribution of hand stiffness terms in the stabilization of the push on stick task. Submitted to *J. Biomechanics*.
- Annexe III Rancourt, D., Roy, P.-O. (2001) Estimation of maximum hand stiffness in the stabilization of force interactive tasks. Submitted to *J. Biomechanics*.
- Annexe IV Rancourt, D., Dubé, C. (1996) Characterization of grip force on a power drill handle. *Proceedings of the Canadian Society for Biomechanics*, Vancouver, pp. 84-85.