

Développement, validation et application d'une méthode quantitative pour évaluer les déplacements des pieds des manutentionnaires

André Plamondon
Antoine Muller
Xavier Robert-Lachaine
Jasmin Vallée-Marcotte
Denys Denis
Christian Larue
Hakim Mecheri
Philippe Corbeil

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1134-fr



NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST (preventionautravail.com)
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2021
ISBN : 978-2-89797-165-6

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail
Avril 2021

Développement, validation et application d'une méthode quantitative pour évaluer les déplacements des pieds des manutentionnaires

André Plamondon¹, Antoine Muller¹,
Xavier Robert-Lachaine^{1,2}, Jasmin Vallée-Marcotte²,
Denys Denis^{1,3}, Christian Larue¹, Hakim Mecheri¹,
Philippe Corbeil²

¹ IRSST

² Université Laval – Département de kinésiologie

³ Université du Québec à Montréal – Département des sciences de l'activité physique

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1134-fr



Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document.

En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

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



ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

Un merci spécial à tous ceux de manière directe ou indirecte ont participé à cette étude. On pense aux volontaires qui ont participé à la séance expérimentale et aux étudiants de l'Université Laval qui ont aidé au traitement des données. On remercie également Martine Poulin pour son soutien majeur au projet et Christian Sirard pour les montages expérimentaux. Enfin, l'IRSST pour son appui financier et les moyens que la direction nous donne pour assurer la réussite de nos projets.

SOMMAIRE

Les troubles musculosquelettiques lors d'activités de manutention manuelle (**MM**) sont encore très présents dans nos milieux de travail. Les facteurs de risque biomécanique les plus souvent associés aux douleurs au dos incluent la manutention manuelle, les répétitions excessives, les torsions du tronc et les levers de charges lourdes. Plusieurs déterminants d'une tâche de MM ont été étudiés pour déterminer leur importance sur l'exposition physique des travailleurs. Par exemple, la hauteur de la charge, la distance initiale de la charge par rapport au corps, la masse soulevée et la vitesse du soulèvement sont tous des déterminants liés à la grandeur du moment externe L5/S1 ou à celle de la force de compression.

L'une des mesures de prévention les plus fréquemment préconisées en MM vise à soulever les caisses dans une posture symétrique afin d'éviter les mouvements de torsion du tronc. Une des façons de limiter les asymétries de posture consiste à faire face à la charge à soulever et à laisser les pieds de se déplacer librement. Le placement des pieds est un paramètre clé pour décrire le comportement moteur du manutentionnaire (**Ma**) pour se rapprocher de la charge à soulever, pour diminuer les asymétries de postures, et pour se déplacer du lieu de prise vers le lieu de dépôt (phase de transition). Toutefois, il existe très peu d'informations disponibles sur les différentes stratégies de déplacement des pieds durant cette phase.

Une étude a proposé une métrologie pour classer et pour quantifier les déplacements des pieds (Wagner, Kirschweg et Reed, 2009; Wagner, Reed et Chaffin, 2010), mais cette méthode comportait des limites importantes. L'objectif général de cette recherche visait principalement à s'approprier la méthode de Wagner *et al.* (2009, 2010) en l'adaptant aux besoins de cette étude et à valider la méthode améliorée en permettant de quantifier les déplacements des manutentionnaires. Une nouvelle taxonomie capable de déterminer les stratégies de déplacement des pieds des Ma a donc été développée et validée, puis appliquée sur des données existantes de Plamondon *et al.* (2010) et de Plamondon *et al.* (2014) pour définir les stratégies de placements des pieds les plus communes (chapitre 3) et aussi celles entre des Ma experts et novices (chapitre 4). Comme les techniques d'apprentissage automatique (*Machine Learning*) sont de plus en plus populaires et amènent des économies de temps d'analyse (surtout en limitant le temps d'observations manuelles), une technique proposant un classement automatique des stratégies de placement des pieds par apprentissage automatique a été énoncée (chapitre 5), puis mise à l'épreuve dans une comparaison entre des observations réelles et celles prédites par cette technique (chapitre 6). Enfin, une phase expérimentale en laboratoire consistait à appliquer la méthode de détection des pas sur 15 Ma novices sous l'effet de quatre déterminants majeurs en manutention : la hauteur de prise et de dépôt; la distance de transfert (contraignant la possibilité de déplacer les pieds); la masse de la charge; et la cadence (chapitre 7).

Dans les retombées majeures, nous avons maintenant une méthode pour classer par observations et de façon automatique les placements des pieds. De nouvelles connaissances sur les stratégies de placement et de déplacement des pieds chez les experts et les novices ont également été ajoutées ce qui permettra de bonifier les programmes de formation en manutention. À titre d'exemple, les experts ont tendance à opter pour une stratégie de déplacement des pieds plus statique et progressive, alors que les novices sont plus fluides et variables. Les stratégies de placement des pieds ont aussi des impacts sur les moments résultants et asymétriques à l'instant du lever. Enfin, cette méthode améliorée devrait servir à mieux documenter les déplacements des pieds des manutentionnaires en laboratoire et éventuellement lors d'observations du travail réel en entreprise.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE	iii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xiii
1. INTRODUCTION	1
1.1 Les facteurs de risque biomécanique.....	1
1.2 Les placements des pieds	2
1.3 L'espace disponible	2
1.4 La cadence de travail	4
1.5 Les déplacements des pieds	4
1.6 La quantification des déplacements des pieds.....	5
1.7 Les limites de la méthode de Wagner et al (2009, 2010).....	6
1.8 L'automatisation des stratégies de placement des pieds	6
1.9 Les points essentiels du projet	7
2. OBJECTIFS DE RECHERCHE	9
3. MÉTHODE DE CLASSIFICATION DU DÉPLACEMENT DES PIEDS DES MANUTENTIONNAIRES	11
3.1 Introduction.....	11
3.2 Méthode	11
3.2.1 Taxonomie	11
3.2.2 Fidélité et reproductibilité	17
3.3 Résultats	18
3.3.1 Fidélité intrajuge	18
3.3.2 Fidélité interjuge	19
3.3.3 Application de la taxonomie	19
3.4 Discussion	22
3.4.1 Fidélité intra et inter juge	22
3.4.2 Bénéfices de la taxonomie.....	23
3.4.3 Limites de la taxonomie	24
3.5 Conclusion.....	25

4.	DIFFÉRENCE ENTRE EXPERTS ET NOVICES DANS LES STRATÉGIES DE DÉPLACEMENTS DES PIEDS DURANT UNE TÂCHE DE MANUTENTION	27
4.1	Introduction.....	27
4.2	Méthode	27
4.2.1	Participants	27
4.2.2	Équipements	28
4.2.3	Protocole expérimental	28
4.2.4	Traitement et analyse des données.....	28
4.2.5	Variables dépendantes biomécaniques	29
4.2.6	Analyses statistiques	29
4.3	Résultats	30
4.3.1	Comparaison des stratégies entre experts et novices	33
4.3.2	Effet de l'expertise et des stratégies sur les moments.....	35
4.3.3	Comparaison de la variabilité entre experts et novices	38
4.4	Discussion	39
4.4.1	La fréquence d'utilisation des stratégies.....	39
4.4.2	La variabilité dans l'utilisation des stratégies	40
4.4.3	Les effets de la stratégie des pieds sur le chargement lombaire.....	40
4.5	Conclusion.....	41
5.	UNE MÉTHODE D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE POUR LA CLASSIFICATION ET L'ANALYSE DES PLACEMENTS DES PIEDS : APPLICATION À LA MANUTENTION MANUELLE	43
5.1	Introduction.....	43
5.2	Méthode	43
5.2.1	Exemple d'application	43
5.2.2	Caractéristiques des entrées	44
5.2.3	Algorithme de classification	47
5.2.4	L'analyse des données	47
5.3	Résultats	49
5.3.1	Fidélité intrajuge	49
5.3.2	Performance du modèle de classification	49
5.3.3	Analyse	49
5.4	Discussion	50
5.5	Conclusion.....	54
6.	COMPARAISON DE DEUX MÉTHODES DE CLASSIFICATION DES PLACEMENTS DE PIEDS : CLASSIFICATION AUTOMATIQUE VS PAR OBSERVATION	55
6.1	Introduction.....	55

6.2	Méthode	55
6.2.1	Données expérimentales	55
6.2.2	Classification des placements des pieds	55
6.2.3	Analyse des données	56
6.3	Résultats	56
6.4	Discussion/conclusion	57
7.	TESTS EN LABORATOIRE : APPLICATION DE LA MÉTHODE DE DÉTECTION DES PAS LORS D'ACTIVITÉS DE MANUTENTION MANUELLE	59
7.1	Introduction.....	59
7.2	Méthodes.....	59
7.2.1	Participants	59
7.2.2	Instrumentations	59
7.2.3	Protocole expérimental	60
7.2.4	Traitement des données	61
7.2.5	Analyses statistiques	62
7.3	Résultats	62
7.4	Discussion	67
7.5	Conclusion.....	68
8.	RETOMBÉES DE L'ÉTUDE.....	69
8.1	Objectifs et retombées	69
8.2	Les hypothèses de recherches	69
8.3	Limites de l'étude	70
8.4	Conclusion finale	70
	BIBLIOGRAPHIE	71
	ANNEXE A : Représentations visuelles des quatre instants du cycle de manutention.....	79
	ANNEXE B : Représentations visuelles des déplacements aux quatre instants du cycle de manutention représentés par une pose {pieds faces}.	81
	ANNEXE C : Représentations visuelles des déplacements pour la phase de transfert.	83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1.	Définition des poses pour les placements des pieds au premier contact, au lever, au prédépôt et au dépôt	13
Tableau 3.2.	Pose des déplacements des pieds aux instants clés : premier contact, lever, prédépôt et dépôt	15
Tableau 3.3.	Pose de déplacement des pieds durant le transfert	15
Tableau 3.4.	Fidélité intrajuge et interjuge, évaluée en utilisant le pourcentage de concordance (accord), le kappa (k) de Cohen, le PABAK et l'AC1 de Gwet pour les quatre instants clés ainsi que la pose de la phase de transfert de la tâche manutention	19
Tableau 3.5.	Les principales stratégies (placement et déplacement) pour les quatre instants clés de la tâche de manutention	20
Tableau 3.6.	Stratégies les plus fréquemment utilisées pour chacune des phases de manutention ainsi que les cinq séquences complètes les plus fréquemment employées	21
Tableau 4.1.	Caractéristiques anthropométriques des participants (n=30) de chaque groupe (adapté de Plamondon <i>et al.</i> , 2010).....	27
Tableau 4.2.	Fréquences moyennes (ET) des poses de placement et de déplacements aux instants clés, ainsi que les déplacements en phase de transfert exprimés en pourcentages d'utilisation	34
Tableau 4.3.	Moments nets normalisés sagittal et asymétrique (moyenne-M et écart-type-ET) pendant les instants clés de lever (L) et de dépôt (D) pour quatre poses de placements, ainsi que les moments cumulés normalisés pour deux déplacements durant le transfert	37
Tableau 4.4.	Indice de constance des poses de placement et de déplacement chez les novices et les experts	38
Tableau 5.1.	Évaluation de la méthode de classification du placement du pied en termes d'exactitude, de sensibilité, de spécificité et d'aire sous la courbe (AUC). L'évaluation était basée sur l'ensemble de données tests	49
Tableau 5.2.	Moyenne (écart-type) des caractéristiques des placements de pieds du sujet sélectionné dans chaque groupe. Ces données étaient exclues de celles d'apprentissage et de test	50
Tableau 6.1.	Évaluation de la méthode de classification automatique des placements de pieds à la prise en termes d'exactitude, sensibilité, spécificité et surface sous la courbe (AUC)	56
Tableau 6.2.	Évaluation de la méthode de classification automatique des placements de pieds au dépôt en termes de justesse, sensibilité, spécificité et surface sous la courbe (AUC)	57

Tableau 7.1.	Moyennes marginales des variables dépendantes pour chaque facteur et valeurs <i>P</i> associées aux effets principaux testés dans l'analyse de variance à mesures répétées à quatre voies	64
Tableau 7.2.	Type de placement des pieds (fréquence en %) lors du lever en fonction des quatre différentes conditions expérimentales : hauteur, distance, masse, cadence	65
Tableau 7.3.	Effet de la hauteur des tablettes, de la distance des palettes, de la charge à soulever et de la cadence en fonction du placement des pieds sur les moments résultants et asymétriques maximaux à L5/S1 (moyenne et (écart-type)) à l'instant du lever	66

LISTE DES FIGURES

Figure 3-1.	Phases et instants clés d'un cycle typique de manutention (0 % à 100 %) ainsi que les poses de placement et de déplacement attribuées à chaque phase et instant clé.	12
Figure 3-2.	Illustration des poses typiques de placement des pieds aux instants clés du cycle de manutention par rapport à la palette de lever. {E}= Pieds faces égaux; {S}=Pied controlatéral en avant; {R}= Pied ipsilatéral en avant; {I}= Pieds parallèle ipsilatéral; {C}= Pieds parallèle controlatéral.	14
Figure 3-3.	Exemple d'une séquence : $S = \{E_{N-M}, E_{P-T}, T_O, S_{N-M}, E_{N-M}\}$, dans laquelle les nombres indiquent l'ordre de chaque pas.	16
Figure 4-1.	Effet de traitement relatif (RTE) sur des intervalles de confiance (95 %) pour la fréquence d'utilisation des cinq poses de placement aux instants clés suivants : Premier contact (A); Lever (B); Prédépôt (C); et Dépôt (D).	31
Figure 4-2.	Effet de traitement relatif (RTE) sur des intervalles de confiance (95 %) pour la fréquence d'utilisation des cinq poses de déplacement aux instants clés suivants : Premier contact (A); Lever (B); Prédépôt (C); et Dépôt (D); ainsi que pour la phase de transfert (E).	32
Figure 4-3.	Effet de traitement relatif (RTE) sur le moment sagittal et le moment asymétrique à L5/S1 pendant le lever, et le dépôt, ainsi que sur le moment sagittal cumulé pendant la phase de transfert.	36
Figure 4-4.	Coefficients de constance des placements (A) et des déplacements (B) pendant les quatre instants clés de la tâche de manutention pour les novices et les experts.	39
Figure 5-1.	Plateau expérimental permettant de transférer 24 boîtes (quatre niveaux de six boîtes) d'une palette à l'autre.	44
Figure 5-2.	Exemple de placement des pieds d'une tâche de lever (entre la phase de lever et de dépôt).	46
Figure 5-3.	Représentation de l'architecture d'analyse.	48
Figure 5-4.	Visualisation de toutes les classes de placement des pieds.	48
Figure 5-5.	Classement du placement des pieds lorsque les caisses se trouvent sur la rangée supérieure. La représentation est la même que celle de la figure 5-4.	51
Figure 5-6.	Classement du placement des pieds lorsque les caisses sont proches du sol. La représentation est la même que celle de la figure 5-4.	51
Figure 5-7.	Placement du pied lors du premier pas lorsqu'au lever le placement des pieds était dans le groupe Face.	53
Figure 7-1.	Illustration d'un participant dans l'une des tâches de manutention.	61
Figure A-1.	Représentation visuelle des quatre instants du cycle de manutention.	79

Figure B-1.	Représentations visuelles d'un déplacement des pieds typique aux quatre instants du cycle de manutention débutant par une pose {Pieds faces}.	81
Figure C-1.	Représentations visuelles des déplacements des pieds qui peuvent être observés durant la phase de transfert.	83

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

TMS : Troubles musculosquelettiques

MM : Manutention manuelle

Ma : Manutentionnaire

1. INTRODUCTION

Les troubles musculosquelettiques (**TMS**) lors d'activités de manutention manuelle (**MM**) sont encore très présents dans nos milieux de travail. Pour l'ensemble des lésions recensées par la CNESST entre 2013 et 2017, 16,5 % des lésions (75 921 cas) concernaient les TMS reliés à la MM (Boucher, Duguay, Prud'homme et Busque, 2019). Sur l'année 2017, les débours reliés à la MM s'élevaient à 155 millions de dollars, soit 16,3 % des débours totaux versés aux lésions professionnelles par la CNESST; le siège de la lésion était localisé en majorité au dos (9 767 cas = 9,9 %). Sur les 75 921 cas répertoriés s'étendant entre 2013-2017, 30 063 cas (39,6 %) des lésions se produisaient lors d'efforts excessifs en soulevant quelque chose et 13 148 cas (17,3 %) lors d'efforts excessifs en tenant, transportant et brandissant des objets (Boucher *et al.*, 2019). Il y a donc lieu de s'intéresser non seulement aux efforts de soulever, mais également à ceux de maintien et de transport d'objets.

1.1 Les facteurs de risque biomécanique

Les facteurs de risque biomécanique les plus souvent associés aux douleurs au dos incluent la manutention manuelle (principalement le lever et le transport), les répétitions excessives, les torsions du tronc et les levers de charges lourdes (Bernard *et al.*, 1997; Burdorf et Sorock, 1997; Kuiper *et al.*, 1999; National Research Council [NRC], 2001; Lötters, Burdorf, Kuiper et Miedema, 2003; Bakker, Verhagen, van Trijffel, Lucas et Koes, 2009; Nelson et Hughes, 2009; da Costa et Vieira, 2010; Heneweer, Staes, Aufdemkampe, van Rijn et Vanhees, 2011). Aussi, de nombreuses conditions externes d'une tâche de MM ont été étudiées pour déterminer leur importance sur l'exposition physique des travailleurs. Par exemple, la hauteur de la charge, la distance initiale de la charge par rapport au corps, la masse soulevée et la vitesse du lever sont tous des déterminants liés à la grandeur du moment externe L5/S1 ou à celle de la force de compression (Harari, Riemer et Bechar, 2019; Hoozemans, Kingma, de Vries et van Dieen, 2008; Lavender, Andersson, Schipplein et Fuentes, 2003; Plamondon *et al.*, 2014; Plamondon, Larivière *et al.*, 2012; Plamondon, Larivière, Denis, Mecheri et Nastasia, 2017). L'équation du NIOSH (Waters, Putz-Anderson, Garg et Fine, 1993) tient d'ailleurs compte de la hauteur de travail, de la distance de la charge au corps, de l'asymétrie de la charge et de la fréquence de manutention pour déterminer la charge maximale recommandée pour une condition de manutention donnée. En outre, l'une des mesures de prévention les plus fréquemment préconisées en MM vise à soulever les caisses dans une posture symétrique afin d'éviter les mouvements de torsion du tronc (American Conference of Governmental Industrial Hygienists [ACGIH], 2004; Graveling, Melrose et Hanson, 2003; International Standard Organization [ISO], 2003; Mital, Nicholson et Ayoub, 1997; Waters *et al.*, 1993; Ayoub et Mital, 1989). Le risque de blessures au dos dans une posture asymétrique lors de lever de caisses s'explique par une élévation du chargement au dos (forces de compression et cisaillement) causée par une augmentation des cocontractions musculaires nécessaires pour effectuer la tâche (Gallagher et Schall, 2017; Kim et Zhang, 2017; Marras, 2008; Davis et Marras, 2005). Une posture asymétrique pourrait également augmenter les risques d'hernies discales (Kelsey *et al.*, 1984) et diminuerait la capacité maximale acceptable de lever (Keyserling, 2000). Une des façons de limiter les asymétries de posture consiste à faire face à la charge à soulever (Plamondon, Gagnon et Gravel, 1995) et à laisser les pieds libres de se déplacer (Gagnon, 2003, Lorenz, Lavender et Andersson, 2002).

1.2 Les placements des pieds

Un premier aspect négligé dans la littérature concerne le placement des pieds à la prise et au dépôt qui doivent être près de la charge de manière à réduire le bras de résistance de la charge et ainsi diminuer les moments et les forces de compression au dos (Kingma, Bosch, Bruins et van Dieën, 2004). Certaines études ont évalué l'impact du placement et des déplacements des pieds sur la charge lombaire durant le transfert d'une charge. En général, les résultats ont montré que certaines positions des pieds influencent les forces de compression et de cisaillement (Kingma *et al.*, 2004; Plamondon, Delisle, Trimble, Desjardins et Rickwood, 2006; Zhou, Dai et Ning, 2013) et que le déplacement des pieds réduit l'asymétrie de la posture (Delisle, Gagnon et Desjardins, 1996). Cependant, l'accent a été mis sur la phase de lever dans laquelle les stratégies de déplacement des pieds dans tout le cycle de travail ont été négligées. Dans certaines études, les sujets ont été invités à effectuer une tâche en adoptant un ou plusieurs types de placement de pieds prédéfinis (Kirby, Price et MacLeod, 1987; Delisle *et al.*, 1996; Deslile, Gagnon et Desjardins, 1999; Zhou, Ning, Hu et Dai, 2016). En utilisant cette approche, il a été possible d'observer l'influence du placement des pieds sur des variables biomécaniques telles que l'équilibre ou le chargement lombaire. Par contre, elle ne permet pas d'observer la stratégie naturellement adoptée par un participant dans un contexte spécifique. D'autres études ont porté sur un choix libre de placement des pieds. Sur la base d'enregistrements vidéo numériques, les placements des pieds ont été classés a posteriori dans des groupes prédéfinis (Bhatt, Pieruccini-Faria et Almeida, 2013; Adamson, Gilmore, Stratton, Baktash et Jog, 2019). Toutefois, cette approche est très longue lorsque la quantité de données est importante et une automatisation serait plus qu'avantageuse.

Le placement des pieds est un paramètre clé pour décrire le comportement moteur du Ma pour se rapprocher de la charge à soulever, pour diminuer les asymétries de postures, et pour se déplacer vers le lieu de dépôt. Aussi, il se trouve que les stratégies de placement des pieds sont différentes entre les travailleurs novices et les experts (Lortie, 2002). Plusieurs études ont évalué les techniques de travail pour vérifier si les experts travaillaient de manière plus sécuritaire que les novices (Authier, Gagnon et Lortie, 1995; Authier, Lortie et Gagnon, 1996; Granata, Marras et Davis, 1999; Marras *et al.*, 2006; Plamondon *et al.*, 2014). Ces études ont clairement établi certains effets de l'expertise sur les stratégies de travail. Par exemple, Authier *et al.* (1996) ont noté que les experts ont choisi des techniques de MM assez différentes de celles des novices, notamment en ce qui concerne la position des genoux, des pieds et du bassin, l'emplacement de la prise, le mouvement des pieds pendant le transfert et la position de la boîte durant la MM. Aussi, Plamondon *et al.* (2010) et Plamondon *et al.* (2014) ont démontré que les experts par rapport aux novices inclinaient moins leur tronc tout en fléchissant plus les genoux lors d'un lever des caisses au sol. Toutefois, aucune étude ne s'est encore intéressée à comparer les experts des novices dans leurs façons de placer leurs pieds dans une tâche de MM.

1.3 L'espace disponible

Un second aspect concerne l'espace disponible/restrict. Drury (1985) définit trois niveaux d'espace restrictif soit : 1) un espace si petit qu'un opérateur ne peut s'insérer dans l'espace disponible et/ou que la tâche de travail ne peut être réalisée avec succès; 2) un espace où une tâche peut être accomplie, mais dans lequel de l'espace supplémentaire serait nécessaire pour améliorer la performance ou encore diminuer le stress de l'opérateur; 3) un espace si grand qu'il n'existe aucun avantage à l'agrandir pour améliorer la performance ou diminuer le stress.

L'espace de niveau 1 est déterminé par l'anthropométrie de l'individu tandis les niveaux 2 et 3 sont séparés par des critères de performance et de stress. Le travail de MM peut être très fréquemment restreint, par exemple, dans les centres de distribution alimentaires où une majorité des produits sont casés dans des baies dont les dimensions peuvent limiter non seulement la hauteur de travail, mais également les façons de se déplacer pour les manutentionnaires (**Ma**). Un problème majeur des espaces de travail restreints fait en sorte de contraindre un travailleur dans ses façons de faire le limitant à une seule technique de travail (Drury, 1985). Dans un espace libre, un travailleur peut varier ses méthodes de travail pour, par exemple, limiter sa fatigue (Drury, 1985).

Les études biomécaniques se sont très peu intéressées à étudier les effets d'un espace restreint sur la performance des Ma. Toutefois, c'est à cause de petites plateformes de force, qui limitaient les déplacements des pieds des participants, qu'une majorité d'études biomécaniques ont, bien malgré elles, indiqué une augmentation des asymétries de posture et de chargement au dos lors de tâches de manutention réalisées en laboratoire. Ainsi, dès que les pieds sont fixes au sol (leur déplacement étant limité par une petite plateforme) et qu'un déplacement de charge s'effectue dans une direction horizontale (peu importe l'élévation verticale), des asymétries de posture et de chargement au dos sont toujours observées (Gagnon et Gagnon, 1992; Gagnon, Plamondon, Gravel et Lortie, 1996; Lavender, Li, Andersson et Natarajan, 1999; Plamondon *et al.*, 1995; Kingma *et al.*, 1998; Marras, Ferguson, Burr, Davis et Gupta, 2004; Kim et Zhang, 2017). Lorsque les pieds ne sont pas contraints comme dans le cas de l'utilisation d'une grande plateforme de force, les asymétries de posture à la prise et au dépôt (angles de torsion et de flexion latérale lombaire) demeurent faibles ne dépassant pas en moyenne 6 ° chez des Ma experts ou novices (Plamondon *et al.*, 2010). D'après Lavender, Lorenz et Andersson (2007), la recommandation d'effectuer un pas lors d'un transfert de caisse aurait pour effet de limiter les asymétries de posture chez les Ma. Un moyen simple d'y parvenir consiste à augmenter la distance entre le lieu de prise et de dépôt. Une étude de Mehta, Kim, Weiler et Lavender (2014) indique que la distance optimale de transfert de caisse se situerait entre 1 et 1,25 m ce qui forcerait le Ma à effectuer un pas et limiterait les asymétries de postures. Bien évidemment, le désavantage de cette technique tient du fait qu'elle prolonge la durée de transfert. Néanmoins, les résultats de Mehta *et al.* (2014) pourraient expliquer pourquoi les asymétries de posture dans l'étude de Plamondon *et al.* (2010) étaient si faibles : la distance de transfert de caisses entre les deux palettes était de 1,65 m obligeant les 10 Ma observés¹ d'effectuer un ou deux pas 77 % du temps lors du transfert. Ces résultats n'ont malheureusement jamais été quantifiés et une analyse exhaustive de ces données permettrait de mieux analyser les stratégies de déplacement des pieds et leur rôle sur les asymétries de posture. Comme l'a souligné Gagnon (2003, 2005) ainsi que Davis, Splittstoesser et Marras (2003), le fait de pouvoir ou non déplacer les pieds est un déterminant important pour limiter les asymétries de posture et conséquemment le chargement au dos.

Dans une étude sur la MM d'une entreprise de transport, Baril-Gingras et Lortie (1995) ont évalué qu'approximativement 15 % des efforts en flexion avant étaient accompagnés de torsion du tronc et que cette torsion était présente dans près de 50 % des activités de MM. Les pieds des Ma n'étaient généralement pas orientés dans la même direction que les membres supérieurs, ce qui favorisait une posture asymétrique du dos. Toutefois, la raison possible de ces asymétries n'était pas claire, les auteurs n'attribuant pas directement la cause à des espaces restreints des pieds,

¹ Dix manutentionnaires (5 experts et 5 novices) sur 30 ont été observés ergonomiquement (Plamondon *et al.*, 2010)

mais plutôt au fait qu'il est moins coûteux, énergiquement parlant, d'effectuer une torsion plutôt qu'un déplacement des pieds. Par exemple, un mouvement horizontal (rarement observé dans leur étude) s'étendant d'un côté du corps vers l'autre assure une continuité de mouvement de la charge (*momentum*) et cette continuité est considérée comme un but important pour les Ma. Un compromis entre efficacité (énergétique) et sécurité est un choix difficile et doit tenir compte du contexte de travail.

1.4 La cadence de travail

La cadence de travail en MM est une variable qui affecterait les déplacements des Ma. La cadence de manutention, c'est-à-dire le nombre de charges soulevées par minute, est une variable qui est prise en compte dans plusieurs outils dédiés à l'évaluation du risque physique en MM (Snook et Ciriello, 1991; Waters *et al.*, 1993; ISO, 2003). Par exemple, la cadence est un facteur important dans l'équation du NIOSH qui limite le poids des charges maximales recommandées pour un soulèvement (Waters *et al.*, 1993). L'impact de la cadence en MM, associée à une augmentation de la vitesse, sur les chargements au dos a été très fréquemment étudié et généralement son effet est d'augmenter les chargements au dos (Bernard, Ayoub et Lin, 1999; Buseck, Schipplein, Andersson et Andriacchi, 1988; Bush-Joseph, Schipplein, Andersson et Andriacchi, 1988; Lavender *et al.*, 2003; Lavender *et al.*, 1999). Il y existe toutefois des exceptions comme dans l'étude de Marras *et al.* (2006) dans laquelle les chercheurs ont démontré qu'une faible cadence de travail augmente les chargements chez les experts, alors qu'une cadence élevée augmente les chargements chez les novices. Aussi, lorsque la variable considérée est le cumul dans le temps du chargement lombaire, la vitesse (cadence) a pour effet de réduire ce cumul principalement parce que la durée de transport des caisses diminue (Greenland, Merryweather et Blowski, 2013). Enfin, Plamondon, Denis *et al.* (2012) ont montré que les façons de faire d'hommes Ma (experts, novices) et de femmes Ma étaient différentes lorsque la cadence de MM était modifiée. Par conséquent, la cadence peut jouer un rôle majeur et faire ressortir les différences dans le comportement des Ma. Des conditions de travail dans lesquelles des Ma seraient limités dans leur espace de travail et soumis à une cadence élevée de travail affecteraient très certainement leurs déplacements.

1.5 Les déplacements des pieds

Denis *et al.* (2011) définissent la manière de parcourir l'espace entre la prise et le dépôt comme « la phase de transition ». La durée ainsi que le parcours du Ma lors de cette phase de transition devraient idéalement être courts pour limiter les effets de fatigue. Cette règle d'action est l'une des 8 règles (principes) de manutention définies par Denis *et al.* (2011) dans la SIPM (stratégie intégrée de prévention en manutention) qui détermine les compétences d'un Ma. Toutefois, il existe très peu d'informations disponibles sur cette phase de transition et plus particulièrement sur les différentes stratégies de déplacement des pieds dans cette phase.

Quelques rares études se sont intéressées en laboratoire à la phase de transition. L'analyse des tâches de MM impliquant des déplacements des pieds s'est attardée davantage sur les aspects cinématiques du mouvement que cinétiques (Authier *et al.*, 1995; Authier *et al.*, 1996; Delisle *et al.*, 1996; Wagner *et al.*, 2009; Wagner *et al.*, 2010). Dans leurs études, Authier *et al.* (1995) et Authier *et al.* (1996) ont caractérisé qualitativement, entre autres, les déplacements des pieds les plus communs observés auprès de six Ma experts et six novices lors de transferts de caisses à l'intérieur d'un espace de travail inférieur à deux mètres (entre le lieu de prise et de dépôt). Ces

déplacements ont été classés en trois groupes : ouvert, formant un angle, et parallèle (Authier *et al.*, 1995). Quatre de ces déplacements (deux déplacements de type expert et deux déplacements de type novice) ont été enseignés à des Ma novices puis analysés selon un paradigme à mesures répétées démontrant ainsi que les stratégies de déplacement de type expert réduisaient soit le parcours de la caisse (donc le travail mécanique) ou encore les asymétries de posture (Delisle *et al.*, 1996,1999). Peu d'effets ont été observés en ce qui concerne la grandeur des moments de force au dos, bien que la méthode utilisée pour les calculer était limitée en raison de l'absence d'une plateforme de force (Delisle *et al.*, 1999). Ces derniers concluent que les déplacements des pieds ont clairement un impact sur les asymétries de posture et qu'ils doivent être considérés dans les principes de manutention enseignés dans les programmes de formation.

1.6 La quantification des déplacements des pieds

Une raison possible pour laquelle la phase de transition et plus spécifiquement les stratégies de déplacement des Ma sont peu étudiées c'est qu'ils sont complexes à quantifier. Une récente étude a proposé une métrologie pour classer et pour quantifier les déplacements des pieds (Wagner *et al.*, 2009; Wagner *et al.*, 2010)². Une première partie, appelée le « L-TRACS » pour « *Lexical Transition Classification System* » consiste à paramétrer, selon la direction du participant et des pieds, le comportement du Ma lors de ses déplacements. Sans entrer en détail, cette première partie de la méthode sert à documenter les patrons de déplacement et est utile pour comparer et grouper les divers comportements des travailleurs. Par exemple, il spécifie le nombre de pas et leur séquence, mais ne précise pas la position des pieds. La seconde partie, le « Q-TRACS » (Q = Quantitative) définit un ensemble unique de positions relatives des pieds et leurs composantes temporelles du pied (contact du talon, contact des orteils, lever du talon et lever des orteils) pour chaque pas.

La méthode de Wagner a été mise à l'essai en analysant 42 postes de travail (1 312 tâches impliquant le transport d'objets) d'une chaîne d'assemblage/montage dans une usine de fabrication d'automobiles (Wagner *et al.*, 2009). Les pas effectués par chacun des pieds en situation de manutention ont été décrits à l'aide d'une combinaison d'actions simples : progression, pivot, orientation et déplacement arrière (Wagner *et al.*, 2009). Cette façon de coder les déplacements des pieds a permis de démontrer que les déterminants liés au changement de direction durant le transport d'une caisse entre la saisie et le dépôt (Wagner *et al.*, 2010), et à la distance à parcourir avant le dépôt de la caisse (Wagner et Reed, 2013) ont influencé les stratégies de déplacement des pieds des participants novices (transports effectués dans un espace de travail de 14,4 m²). Par exemple, le mode le plus fréquemment observé a révélé que l'orientation du pied ipsilatéral (du côté où le participant doit se diriger) pendant la tâche de soulèvement était principalement affectée par l'angle de rotation nécessaire pour réorienter le corps vers le lieu de dépôt de la caisse (Wagner *et al.*, 2010). Cette étude a également rapporté que le poids de la charge transportée n'influencait pas les stratégies de déplacement des pieds. Cependant, il convient de mentionner que le soulèvement et le dépôt des caisses étaient effectués à une hauteur optimale ajustée en fonction de la taille des sujets (53 % de la taille) facilitant autant la prise/le dépôt de la caisse que son rapprochement par rapport au corps, ce qui a probablement atténué les effets liés aux poids de la charge. De plus, les conséquences de l'adoption de ces stratégies de déplacement en termes de chargement externe au dos ou de

² Pour de plus amples informations sur la méthode de classification, veuillez-vous référer aux articles.

cumul de chargements n'ont pas été documentées. Il s'avère donc que les stratégies de déplacement des pieds peuvent jouer un rôle majeur pour faciliter un changement de direction de l'ensemble du corps, en plus d'aider au soulèvement de la caisse (Wagner *et al.*, 2010). Peu de choses sont connues sur l'adaptation des stratégies de déplacement en fonction de l'environnement de travail, avec ou sans contraintes des pieds, et leurs conséquences au niveau des chargements lombaires.

1.7 Les limites de la méthode de Wagner et al (2009, 2010)

La méthode « L-TRACS » (Wagner *et al.*, 2009) présente toutefois plusieurs limites. Premièrement, la classe consacrée aux pas de déplacement ne décrit pas complètement le déplacement effectué par le travailleur. Elle regroupe plutôt les types de pas qui ne rentrent pas dans les critères pour être classés dans l'une des trois autres classes. Par exemple, deux déplacements distincts soit un déplacement arrière du pied sans réorientation (du pied) et un autre avec un petit pas arrière avec réorientation seront classés dans la même catégorie de déplacement parce qu'ils ne répondent pas aux critères des autres catégories. Par conséquent, les déplacements des pieds ne peuvent pas être entièrement décrits par la taxonomie. Une seconde limitation est qu'aucune information n'est fournie quant à la position terminale des pieds du Ma. La méthode décrit la pose des pieds et si les talons et/ou les orteils sont en contact ou non avec le sol. Toutefois, la nature du mouvement des pieds, soit statique ou dynamique, pendant la levée (ou le dépôt) et le type de déplacement (le cas échéant) sont inconnus. Il a d'ailleurs été observé que les Ma peuvent bouger leurs pieds pendant la phase de lever (Denis *et al.*, 2013). Une troisième limite est que la taxonomie assume que le Ma se tient toujours de face au lieu de prise et de dépôt. Cependant, plusieurs études ont montré qu'un Ma peut être orienté vers la zone de dépôt pendant une levée de charge (Authier *et al.*, 1995; Authier *et al.*, 1996; Baril-Gingras et Lortie, 1995). Par conséquent, la taxonomie de Wagner ne tient pas compte de l'orientation des pieds lors de la prise ou du dépôt. Une quatrième limitation est que la taxonomie n'est pas en mesure d'identifier des stratégies de déplacement dans des étapes critiques de la tâche. Les déplacements et les placements des pieds du Ma sont observés avant, pendant et immédiatement après la prise de la charge. Cependant, les études ergonomiques et biomécaniques évaluent généralement les stratégies des Ma à l'instant d'étapes critiques de la tâche de manutention manuelle (MM) : au lever, lors de la transition et au dépôt. (Authier *et al.*, 1995; Authier *et al.*, 1996; Plamondon *et al.*, 2010).

Une dernière limite importante du « Q-TRACS » (Wagner *et al.*, 2010) est de paramétrer les orientations des pieds dans une direction locale qui peut ne pas être bien définie ou encore inconnue. Par exemple, les lieux de prises et de dépôt sont très bien connus dans un laboratoire, mais peuvent être difficiles à identifier dans un contexte d'études sur le terrain dans lequel les Ma se déplacent constamment. Avec un système de mesure ambulatoire pour mesurer le mouvement humain, comme celui basé sur des centrales inertielle, il est essentiel de pouvoir compter sur une méthode de quantification qui tient compte de cette réalité du travail.

1.8 L'automatisation des stratégies de placement des pieds

Une classification des stratégies de placements/déplacements des pieds par observations ergonomiques est très longue surtout lorsque la quantité de données est importante et une automatisation serait plus qu'avantageuse. À notre connaissance, il y a eu deux types d'études dans lesquelles les données d'analyse du mouvement ont été utilisées pour classer

automatiquement les stratégies de placement des pieds. Dans un premier type, les stratégies dans les virages de 90 degrés ont été classifiées en virage par pas ou par vrille (Fino, Frames et Lockhart, 2015; Golyski et Hendershot, 2017). Dans ce cas, le pied d'appui pendant le virage a été identifié en utilisant la vitesse angulaire du pelvis et des cuisses ou en utilisant la trajectoire du centre de masse en fonction de la position du pied. Dans le second type (Wagner *et al.*, 2009; Wagner *et al.*, 2010), chaque pas d'une tâche de manutention a été classé dans l'un des quatre groupes suivants : progression, pivot, orientation ou en déplacement en utilisant des critères définis en fonction de la localisation du pied et d'événements spatio-temporels. Ces critères étaient basés sur des seuils pour une ou deux variables telles que la rotation ou la position du pied. Par conséquent, il était difficile d'utiliser une combinaison de toutes les variables ou de tenir compte de critères plus subjectifs utilisés dans les observations. Par exemple, un seuil basé sur le pied avant pourrait être utilisé pour distinguer deux groupes; toutefois, le placement du pied avant ou l'orientation du pied arrière aurait pu ajouter d'autres informations pertinentes sur le choix du groupe. En outre, les critères ont été élaborés pour une situation donnée (dans une usine d'assemblage automobile), et tout changement nécessite une nouvelle sélection de critères.

Les techniques d'apprentissage automatique se multiplient, notamment en biomécanique (Halilaj *et al.*, 2018). Par exemple, elles ont été utilisées pour prédire les forces et les moments de réaction au sol (Johnson, Mian, Donnelly, Lloyd et Alderson, 2018); ou les forces de chargement lombaire (Hou, Zurada, Karwowski, Marras et Davis, 2007) directement à partir de données cinématiques; pour estimer la pose du corps à partir de deux caméras optiques (Mehrizi, Peng, Xu, Zhang et Li, 2019) ou pour détecter les différences liées à l'âge à la marche à partir d'une centrale inertielle (Hu, Dixon, Jacobs, Dennerlein et Schiffman, 2018). L'apprentissage automatique permet de traiter des données multidimensionnelles et de prendre en compte les interactions complexes entre les différents types de données. Cependant, aucune étude ne s'est intéressée au classement automatique des stratégies de placement des pieds par apprentissage automatique.

1.9 Les points essentiels du projet

Les stratégies de placement et de déplacement des pieds utilisées en MM sont minimalement connues et il est essentiel de se pencher sur cette lacune des études en MM. Toutefois, des limites importantes empêchent l'utilisation de la méthode de Wagner *et al.* (2009) et de Wagner *et al.* (2010) et il est nécessaire de développer une nouvelle taxonomie inspirée de travaux antérieurs qui considère deux éléments importants : 1) elle doit inclure une description plus détaillée des placements et des stratégies de déplacement des pieds. Cet élément solutionne les trois premières limites de la méthode de Wagner *et al.* (2009) et de Wagner *et al.* (2010); 2) elle doit tenir compte des instants clés de la tâche de MM de la prise de la charge à son dépôt. En effet, les tâches de MM comprennent certains instants clés. Il est donc important d'établir un lien entre les déplacements des pieds et ces instants afin de comprendre pleinement les stratégies des Ma.

Dans un premier temps, cette recherche propose de s'inspirer des travaux de Wagner *et al.* (2009) et de Wagner *et al.* (2010) pour développer une nouvelle taxonomie capable de déterminer les stratégies de déplacement des Ma. Cette méthode sera validée puis appliquée sur des données existantes de Plamondon *et al.* (2010) et de Plamondon *et al.* (2014) pour définir les stratégies de placements des pieds les plus communs (chapitre 3) et aussi celles entre des Ma

experts et novices (chapitre 4). Comme les techniques d'apprentissage automatique sont de plus en plus populaires et amènent des économies de temps d'analyse (surtout en limitant le temps d'observations manuelles), une technique proposant un classement automatique des stratégies de placement des pieds par apprentissage automatique sera énoncée (chapitre 5) suivi d'une comparaison entre des observations réelles et celles prédites par l'algorithme (chapitre 6). Enfin, une phase expérimentale en laboratoire consiste à appliquer la méthode de détection des déplacements des pieds de 15 Ma novices sous l'effet de quatre déterminants majeurs en manutention : la hauteur de prise et de dépôt; la distance de transfert (avec et sans restrictions des pieds); la masse de la charge; et la cadence (chapitre 7). Cette phase expérimentale devrait nous permettre de constater l'impact de ces déterminants sur les stratégies de placement des pieds des manutentionnaires.

2. OBJECTIFS DE RECHERCHE

Objectif général : Cette recherche visait principalement à s'approprier la méthode de Wagner *et al.* (2009) et de Wagner *et al.* (2010) en l'adaptant aux besoins de la présente étude afin de proposer et de valider une méthode améliorée utile pour quantifier les déplacements des manutentionnaires (Ma).

Objectifs spécifiques :

1. Classifier et quantifier les déplacements de pieds des Ma avec la nouvelle méthode de classification (taxonomie) sur une banque de données existante (Plamondon *et al.*, 2010, 2014 : experts vs novices) pour caractériser les stratégies de déplacement des pieds :
 - a. les plus communs des Ma;
 - b. entre des Ma experts et des Ma novices;
2. Proposer et valider une méthode automatique de classement et d'analyse des déplacements des pieds par apprentissage automatique :
 - a. développement de la méthode;
 - b. validation sur des données existantes.
3. Appliquer la méthode de détection des déplacements des pieds en laboratoire avec des Ma novices en fonction de quatre types de déterminants : l'effet de hauteur, de la distance de transfert entre les palettes, de la masse de la charge et de la cadence de manutention.

L'analyse des effets portera principalement sur :

1. Les stratégies de déplacement des pieds des participants;
2. Les postures observées à la prise et au dépôt;
3. Le chargement au dos;

Hypothèses de travail :

1. Les Ma experts auront des stratégies de déplacement des pieds peu variables et différents des novices;
3. Le type de placements des pieds aura une influence en augmentant ou en diminuant sur les chargements au dos;
4. Les conditions avec restrictions des pieds seront caractérisées par une forte asymétrie de posture au niveau du dos;
5. La cadence imposée aura pour effet d'amplifier l'impact des conditions avec restrictions;

Les objectifs spécifiques ont été réalisés à l'intérieur de plusieurs chapitres. Les données d'origine étaient issues de l'étude de Plamondon *et al.* (2010) et Plamondon *et al.* (2014) à l'exception du chapitre 7 :

- Chapitre 3 (Objectif 1a) : la méthode de classification des déplacements des pieds des manutentionnaires;
- Chapitre 4 (Objectif 1b) : la différence entre experts et novices dans les stratégies de déplacements des pieds durant une tâche de manutention;
- Chapitre 5 (Objectif 2a) : une méthode d'apprentissage automatique pour la classification et l'analyse des placements des pieds : application à la manutention manuelle;
- Chapitre 6 (Objectif 2b) : comparaison de deux méthodes de classification des placements de pieds : classification automatique vs par observation
- Chapitre 7 (Objectif 3) : tests en laboratoire : application de la méthode de détection des pas lors d'activités de manutention.

3. MÉTHODE DE CLASSIFICATION DU DÉPLACEMENT DES PIEDS DES MANUTENTIONNAIRES

3.1 Introduction

Compte tenu de l'importance du placement et du déplacement des pieds des manutentionnaires (**Ma**), une méthode de classification est nécessaire pour les observer et les quantifier, car il n'existe à ce jour aucune étude exhaustive de ces stratégies de déplacement des pieds. Wagner *et al.* (2009) et Wagner *et al.* (2010) ont développé une première approche qualitative (L-TRACS) pour décrire la position et le déplacement du pied, cependant, des limites importantes empêchent les chercheurs de documenter pleinement le placement des pieds des Ma et leurs stratégies de déplacement. Il est donc nécessaire de développer une nouvelle taxonomie inspirée de travaux antérieurs qui considère deux éléments importants : 1) elle doit inclure une description plus détaillée des placements et des stratégies de déplacement des pieds. 2) elle doit tenir compte des moments clés de la tâche de manutention manuelle (**MM**) de la prise de la charge à son dépôt. L'objectif de ce chapitre est de classer et de quantifier les déplacements de pieds des Ma avec une nouvelle méthode de classification (taxonomie) inspirée de la méthode de Wagner *et al.* (2009) et de Wagner *et al.* (2010). Une banque de données existante (Plamondon *et al.*, 2010; Plamondon *et al.*, 2014 : experts vs novices) a servi à caractériser les stratégies de déplacement des pieds les plus communs des Ma.

3.2 Méthode

3.2.1 Taxonomie

Le cycle complet d'une tâche de MM a été découpé en quatre moments (ou instants) clés : 1) le premier contact avec la charge; 2) le lever de la charge; 3) le prédépôt (arrivée); et 4) le dépôt de la charge (figure 3-1, annexe A figure A-1). L'instant du premier contact est initié lorsqu'une main du travailleur entre pour la première fois en contact avec la boîte. L'instant du lever de charge est le moment où la boîte n'est plus en contact avec la surface d'appui. En d'autres termes, le Ma supporte le poids entier de la charge. L'instant du prédépôt concerne celui où le Ma arrive à la palette de dépôt. Deux critères doivent être respectés pour identifier l'instant du prédépôt : 1) un premier pied doit arriver à l'endroit du dépôt. Si le second pied dépasse le premier et se positionne plus près du lieu de dépôt, il ne doit pas dépasser le premier pied de plus d'un demi-pied de longueur. Autrement, ce second pied sera considéré comme celui qui initie le prédépôt; 2) le Ma doit commencer à initier le dépôt de la boîte. Cet instant s'observe lorsque les bras se déplacent vers le haut ou encore lorsque le tronc entre en flexion. L'instant du dépôt détermine celui où la charge touche la surface et que le Ma ne supporte plus le poids total de cette charge. Ces quatre instants divisent le cycle de MM en trois phases : préparation, transfert et dépôt. Ces phases constituent des fenêtres temporelles.

La taxonomie identifie les positions et les déplacements des pieds pendant tout le cycle de MM. Pour chacun des quatre moments clés, un élément de position et de déplacement est attribué. Pendant la phase de transfert, seul un élément de déplacement est assigné pour identifier le patron type dans la succession des pas. Il n'y a pas d'éléments de position dans la phase de transfert parce que de nombreux pas peuvent être exécutés au cours de cette phase et il n'est pas toujours pertinent de les interpréter tous.

3.2.1.1 Classification du placement des pieds

Un placement des pieds est identifié pour chacun des quatre instants clés et codé selon l'un des quatre types de placement (tableau 3.1, figure 3-2, annexe B figure B-1). Les types de pose ont été définis en fonction du placement des pieds par rapport à la palette, à la charge, ainsi qu'à la rotation du corps. Pour les instants clés du premier contact et du lever, la palette de référence est celle du lever. Pour celles des prédépôts et des dépôts, la palette de référence est de fait celle de dépôt. La pose du pied dépend du déplacement effectué par le Ma aux quatre instants. Si aucun déplacement n'est effectué à l'instant clé, le placement se réfère à la position des pieds à cet endroit. En revanche, s'il y a un déplacement lorsque l'instant se produit, la pose identifiée se réfère au placement des pieds précédant le déplacement. Il est possible d'observer des variations de posture entre les poses de type faces, parallèles ainsi que du pied avant controlatéral/ipsilatéral. Par exemple, les pieds peuvent être l'un derrière l'autre {pied controlatéral/ipsilatéral en avant}, mais ceux-ci ne sont pas nécessairement orientés vers la palette {pose parallèle}. Dans ces cas, certains critères doivent être considérés pour choisir la bonne pose de placement (tableau 3.1, figure A-1).

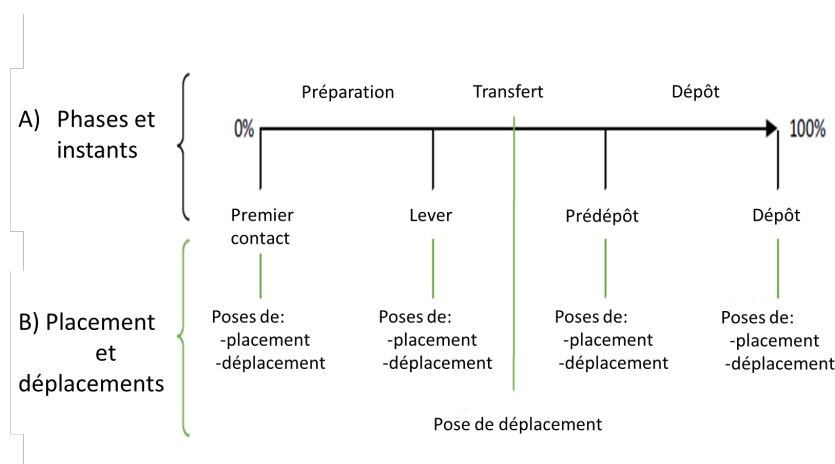


Figure 3-1. Phases et instants clés d'un cycle typique de manutention (0 % à 100 %) ainsi que les poses de placement et de déplacement attribuées à chaque phase et instant clé.

Tableau 3.1. Définition des poses pour les placements des pieds au premier contact, au lever, au prédépôt et au dépôt

Placement	Définition
Pieds faces égaux {E}	Les deux pieds pointant vers la palette (figure 3-2) : à gauche).
Pied controlatéral en avant {S} Pied ipsilatéral en avant {R}	Le pied controlatéral (ou ipsilatéral) est devant l'autre : <ul style="list-style-type: none"> • Lever : Le pied est ipsilatéral ou controlatéral par rapport au sens de la rotation vers le dépôt; • Dépôt : Le pied est ipsilatéral ou controlatéral par rapport au sens de la rotation de retour; • Le pied est considéré comme arrière si les orteils du pied arrière ne dépassent pas le talon du pied avant; • Le pied avant est dirigé vers la palette (< 45°).
Parallèle, ipsilatéral {I} Parallèle controlatéral {C}	Les pieds sont parallèles par rapport à la ligne de largeur de la palette (figure 3-2 : à droite) : <ul style="list-style-type: none"> • Ipsilatéral : pieds orientés dans le sens de la rotation; • Controlatéral : pieds orientés dans le sens opposé de la rotation.
Recoupement entre les différents types de pose	
Rotation des pieds p/r à la palette (0°= pied avant face à la palette)	<ul style="list-style-type: none"> • > 45° : pieds parallèles {I ou C}; • < 45° : voir le critère suivant lié à l'orientation du tronc.
Orientation du tronc	<ul style="list-style-type: none"> • Le haut du corps du Ma ne fait pas face à la palette : Pose parallèle {I ou C}. • Si le haut du corps du Ma fait face à la palette : vérifier si le troisième critère pour le pied controlatéral/ipsilatéral en avant est respecté : <ul style="list-style-type: none"> ○ Oui : pied controlatéral/ipsilatéral en avant {S ou R}; ○ Non : pieds faces égaux {E}.

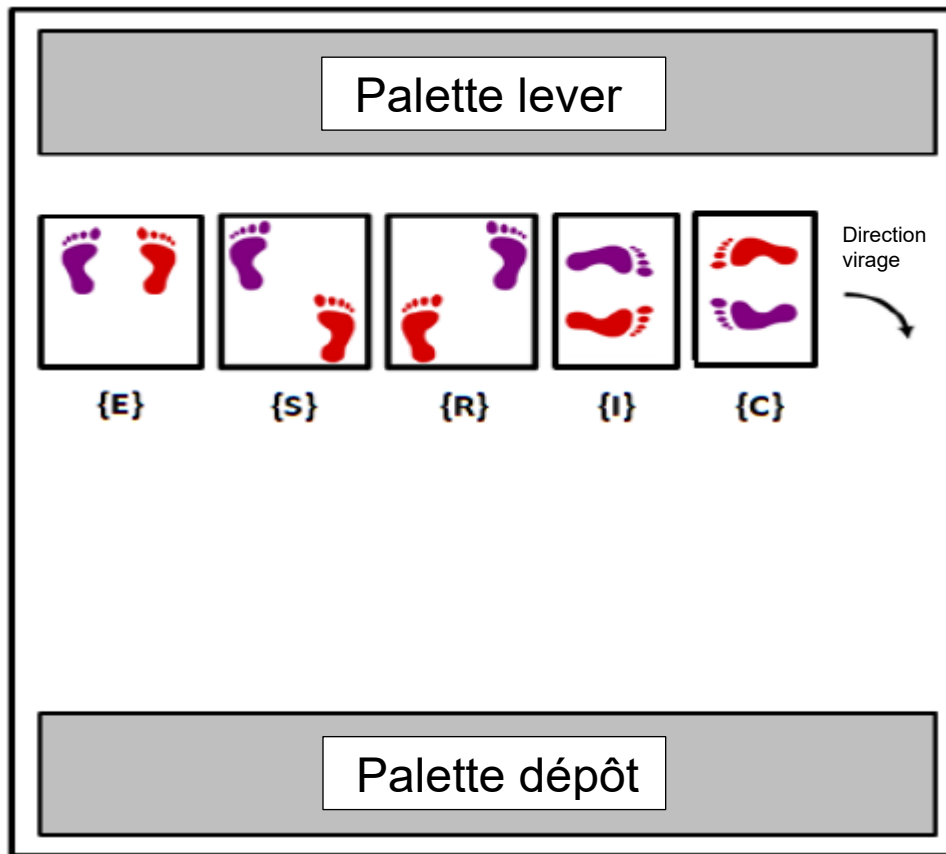


Figure 3-2. Illustration des poses typiques de placement des pieds aux instants clés du cycle de manutention par rapport à la palette de lever. {E}= Pieds faces égaux; {S}=Pied controlatéral en avant; {R}= Pied ipsilatéral en avant; {I}= Pieds parallèle ipsilatéral; {C}= Pieds parallèle controlatéral.

3.2.1.2 Classification des déplacements des pieds

Pour chacun des quatre instants clés de la tâche de MM, il existe une pose de déplacements des pieds (tableau 3.2, annexe B & C). Pour le premier contact, le lever, le prédépôt et le dépôt, la pose se réfère à un seul type de déplacement au moment clé. En outre, la pose pour la phase de transfert diffère de celle des instants clés. Pour les quatre instants, seul un déplacement d'un pied peut se produire (tableau 3.2, figure B-1), mais durant la phase de transfert, la pose se réfère à une succession de pas qui représente le type de la stratégie utilisée par le Ma (tableau 3.3, figure C-1).

Tableau 3.2. Pose des déplacements des pieds aux instants clés : premier contact, lever, prédépôt et dépôt

Code de placement	Définition
Fixe {N-M}	Les pieds restent immobiles ou sont en double appui pendant un cycle de marche (les deux touchent le sol).
Translation arrière {B-T}	Le Ma s'éloigne d'un pas de la palette.
Translation avant {F-T}	Le Ma fait un pas vers la palette.
Pivot du pied arrière {P}	Le pied arrière change d'orientation durant le trajet tout en étant stationnaire.
Combinaison Pivot & translation {P-T}	Le Ma fait un pas tout en changeant l'orientation du pied ipsilatéral.
Contrepoids {C}	Le pied arrière lève, mais le Ma ne fait pas de pas arrière.

Tableau 3.3. Pose de déplacement des pieds durant le transfert

Code de déplacement	Définition
Fixe {N-M}	<ul style="list-style-type: none"> Les pieds restent immobiles.
Virage progressif {Pr}	<ul style="list-style-type: none"> Le manutentionnaire fait au moins 3 pas pour se retourner (180 °). La réorientation du corps se fait graduellement à chaque pas. Le premier pied à bouger est controlatéral.
Virage ouvert {O}	<ul style="list-style-type: none"> Le manutentionnaire fait 2 pas pour se retourner (180°). Le premier pied à bouger est ipsilatéral. Une plus grande réorientation du corps se produit à chaque pas.
Pivot {P}	<ul style="list-style-type: none"> Le virage se fait sur un seul pas. Le pied sur lequel le manutentionnaire supporte son poids pivote pendant le tour.
Crabe {Cr}	<ul style="list-style-type: none"> Le manutentionnaire ne se retourne pas complètement vers le dépôt. Le manutentionnaire fait des pas de côté pour passer de la prise au dépôt.

La combinaison des placements et des déplacements des pieds durant un transfert de caisse compose une séquence (S) spécifique. Ainsi, une séquence est composée de quatre placements terminaux, une pour chacun des quatre instants, et d'une pose pour la phase de transfert {T}. Pour chaque placement terminal, il y a une pose de placement et de déplacement (code). L'exception est la phase de transfert, où il n'y a pas de pose, mais seulement une forme de déplacement. Ainsi, il y a neuf des variables qui décrivent les placements et les déplacements des pieds depuis le premier contact avec la charge jusqu'au dépôt. Une séquence s'exprime comme suit : $S = \{PM, PM, TM, PM, PM\}$, où {P} se réfère à un placement, {M} à un déplacement et {T} à la phase de transfert. Par exemple : $S = \{E_{N-M}, E_{P-T}, T_O, S_{N-M}, E_{N-M}\}$ (figure 3-3). Dans cet exemple, le sujet touche à la charge dans une position des pieds ensemble sans déplacement ({E} = Even ou ensemble et {N-M} aucun déplacement). À l'instant du lever, le sujet effectue un déplacement de translation et de rotation {E_{P-T}}. Dans la phase de transfert {T}, le Ma effectue une rotation ouverte {O}. Lors du prédépôt, le Ma a le pied controlatéral avancé et les pieds ne bougent pas {S_{N-M}}. Après le prédépôt, mais avant l'instant du dépôt, le Ma a déplacé ses pieds pour être ensemble sans déplacement au moment du dépôt {E_{N-M}}.

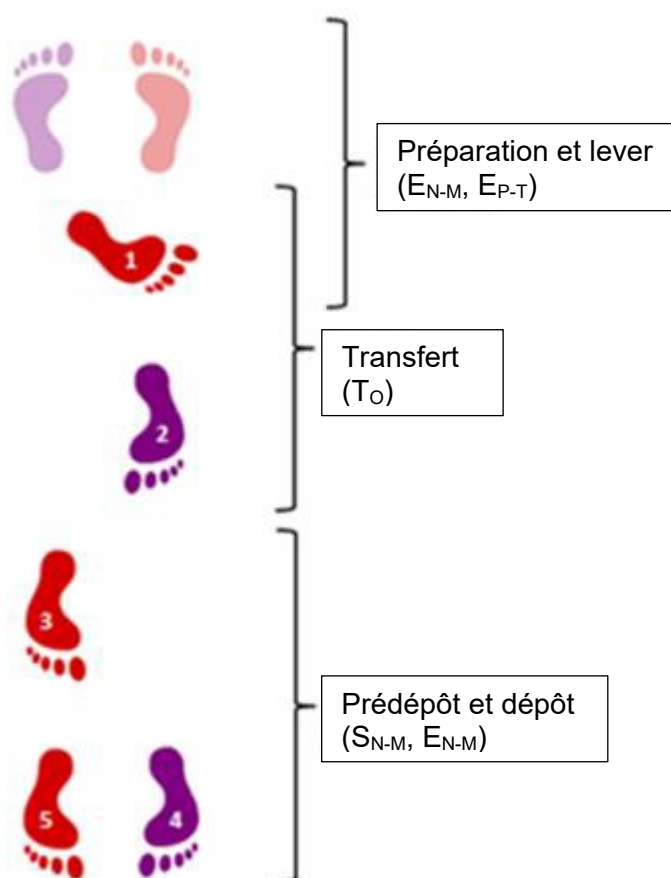


Figure 3-3. Exemple d'une séquence : $S = \{E_{N-M}, E_{P-T}, T_O, S_{N-M}, E_{N-M}\}$, dans laquelle les nombres indiquent l'ordre de chaque pas.

3.2.2 Fidélité et reproductibilité

La taxonomie développée a d'abord nécessité une vérification de la fiabilité et la reproductibilité des critères d'observations de manière à s'assurer que celle-ci était appropriée. Puis, la taxonomie a été appliquée pour caractériser les patrons de déplacement les plus communs chez des manutentionnaires.

3.2.2.1 Participants

Les données de cette phase expérimentale ont été tirées des travaux de Plamondon *et al.* (2010) et de Plamondon *et al.* (2014). Trente sujets masculins ayant divers degrés d'expérience (de moins d'un an à plus de 20 ans) dans la MM ont été recrutés. Tous les participants ont donné leur consentement éclairé en remplissant un formulaire approuvé par le comité d'éthique de l'Université de Sherbrooke (Faculté de médecine et des sciences de la santé).

3.2.2.2 Protocole expérimental

La tâche consistait à transférer 24 boîtes de 15 kg d'une palette à l'autre. Les participants ont déplacé les 24 caisses en continu, l'une après l'autre sur la palette de transfert puis les ont retournées sur la palette d'origine. Cette opération a été répétée cinq fois sur une période de 30 minutes, pour un total de 240 transferts. Deux allers-retours sur cinq ont été effectués à un rythme libre et les trois autres ont été effectués à un rythme rapide de neuf boîtes par minute pour augmenter le niveau de fatigue. Une période de repos de 5 minutes maximum a été allouée entre la dernière série libre et le début de la série rapide.

Les caisses étaient initialement placées sur la palette dans cette configuration : 3 caisses de largeur, 4 caisses de hauteur et 2 caisses de profondeur. La dimension des caisses était de 35 cm de large, 32 cm de hauteur et 26 cm de profondeur. Les palettes avaient une hauteur de 16 cm à partir du sol, étaient espacées de 1,5 m et positionnées à 180 ° l'une par rapport à l'autre. L'aire de travail était équivalente à 2,66 m² (1,90 m x 1,40 m).

3.2.2.3 Système de mesure

Trois caméras vidéo ont été utilisées pour filmer la tâche selon trois angles de vue différents. Les vidéos ont servi à effectuer des analyses ergonomiques et à développer la taxonomie.

3.2.2.4 Instructions aux participants

Il n'y avait pas d'ordre précis dans lequel les caisses devaient être déplacées ou déposées. Les participants avaient reçu l'instruction d'utiliser leurs techniques de MM qu'ils employaient normalement au travail. Aucune autre instruction n'a été donnée sur la manière de procéder pendant la tâche. Cependant, les participants devaient rester sur la plateforme de force durant le transfert.

3.2.2.5 Analyses statistiques

Au total, 60 essais par participant ont été observés en utilisant la taxonomie, pour un total de 1 794 cycles de MM (6 essais ont été rejetés parce que les participants n'ont pas respecté les instructions). Seuls les transferts sur « l'aller » ont été analysés pour cette étude. La fidélité intra

et interjuge a été évaluée en fonction des neuf variables composant la séquence de déplacement. Deux étudiants en ergonomie ont évalué la fidélité. Le premier évaluateur a contribué à l'élaboration de la taxonomie. La fidélité intrajuge a été évaluée en observant à nouveau 23 % de toutes les données (414 transferts) dans un ordre aléatoire. La seconde série d'observations a été effectuée au moins un mois après la première observation. Seul le premier évaluateur a participé à l'évaluation de la fidélité intrajuge. Le second évaluateur a été formé à la taxonomie par le premier lors d'une session de 2 heures. Les critères d'identification de tous les instants clés et les types de placements et déplacements des pieds ont été expliqués au second évaluateur. Des exemples visuels ont été fournis pour faciliter la compréhension de la taxonomie. Le processus de notation du second évaluateur a été soutenu à l'aide d'une liste questions/réponses sur la taxonomie elle-même, mais qui ne portaient pas sur les stratégies des Ma, ni sur les moments clés. La fidélité interjuge a été évaluée sur 10 % des données provenant des transferts de caisse à un rythme libre. Pour l'une des deux séries de transferts de 24 caisses à rythme libre, six transferts (trois transferts en hauteur et trois autres réalisés au sol) par participants ont été observés dans un ordre aléatoire.

La statistique Kappa teste les taux de concordance par rapport à la probabilité d'une notation aléatoire. Toutefois, cette mesure est affectée par la prévalence, qui donnera des valeurs kappa faibles si deux évaluateurs sont fortement en concordance (Feinstein et Cicchetti, 1990). C'est pourquoi un kappa ajusté à la prévalence et au biais (PABAK) a été calculé (dans Excel) à l'aide des formules présentées par Cohen (1960) et Byrt, Bishop et Carlin (1993). De plus, la mesure AC1 de Gwet (Wongpakaran, Wongpakaran, Wedding et Gwet, 2013) a été calculée dans le logiciel R à l'aide du package « irrCAC ». Un pourcentage de concordance interjuge de 80 % a été considéré comme suffisant (Denis, Lortie et Rossignol, 2000; Nurjannah et Siwi, 2017). Une valeur kappa inférieure à 0,00 a été jugée comme étant un faible accord entre les évaluateurs; 0,00 à 0,20, léger accord; 0,21 à 0,40, moyen; 0,41 à 0,60, modéré; 0,61 à 0,80, fort; et 0,81 à 1,00, quasi parfait (Landis et Koch, 1977). Les valeurs médianes, moyennes, maximales et minimales ont été calculées pour les pourcentages de concordance, kappa, PABAK et AC1. Les résultats pour les placements terminaux à chaque instant clé, la pose de la phase de transfert et pour toutes les différentes séquences ont été considérées.

3.3 Résultats

3.3.1 Fidélité intrajuge

Les pourcentages moyen et médian de la concordance (accord) intrajuge étaient respectivement de 0,90 et 0,92 (tableau 3.4). Le pourcentage de concordance le plus élevé a été observé pour la pose de déplacement au moment du prédépôt (0,99), et le pourcentage de concordance le plus faible a été constaté lors de la pose de déplacement à l'instant du lever (0,80). Kappa, PABAK et AC1 varient de 0,00 à 0,83, de 0,55 à 0,98, et de 0,72 à 0,99, respectivement. Une valeur nulle (0,00) de kappa a été observée pour la pose de déplacement lors du prédépôt. Comme le pourcentage de concordance ainsi que l'AC1 ont atteint le seuil de 0,99 et que PABAK de 0,98, cette valeur nulle de kappa est possiblement causée par l'effet de prévalence (Byrt *et al.*, 1993).

Tableau 3.4. Fidélité intrajuge et interjuge, évaluée en utilisant le pourcentage de concordance (accord), le kappa (k) de Cohen, le PABAK et l'AC1 de Gwet pour les quatre instants clés ainsi que la pose de la phase de transfert de la tâche manutention

Phase	Pose	Fidélité intrajuge				Fidélité interjuge			
		Accord	K	PABAK	AC1	Accord	K	PABAK	AC1
1 ^{er} contact	Placement	0,87	0,75	0,69	0,80	0,70	0,55	0,41	0,62
	Déplacement	0,95	0,32	0,88	0,94	0,77	0,14	0,54	0,76
Lever	Placement	0,92	0,83	0,79	0,87	0,82	0,69	0,63	0,77
	Déplacement	0,80	0,65	0,61	0,78	0,80	0,69	0,61	0,78
Transfert	Déplacement	0,87	0,69	0,72	0,86	0,74	0,35	0,49	0,71
Prédépôt	Placement	0,84	0,62	0,55	0,72	0,71	0,50	0,42	0,60
	Déplacement	0,99	0,00	0,98	0,99	0,52	0,01	0,05	0,47
Dépôt	Placement	0,94	0,82	0,78	0,86	0,83	0,71	0,66	0,76
	Déplacement	0,94	0,32	0,86	0,92	0,89	0,51	0,78	0,88
Moyenne		0,90	0,55	0,76	0,86	0,75	0,46	0,51	0,71
Médiane		0,92	0,65	0,78	0,86	0,77	0,51	0,54	0,76
Max		0,99	0,83	0,98	0,99	0,89	0,71	0,78	0,88
Min		0,80	0,00	0,55	0,72	0,52	0,01	0,05	0,47

3.3.2 Fidélité interjuge

Les pourcentages moyen et médian de concordance entre évaluateurs étaient respectivement de 0,75 et 0,77. Sur les quatre instants clés et pour la pose de la phase de transfert, le moment du dépôt était celui pour lequel le pourcentage de concordance était le plus élevé (0,86). À l'opposé, le prédépôt était celui pour lequel le pourcentage était le plus faible (0,62). Le pourcentage de concordance le plus élevé a été enregistré pour la pose de déplacement à l'instant du dépôt (0,89), tandis que le pourcentage de concordance le plus faible a été observé pour la pose de déplacement au moment du prédépôt (0,52).

Les coefficients Kappa, PABAK et AC1 ont varié respectivement de 0,01 à 0,71, 0,05 à 0,78 et 0,47 à 0,88. Pour PABAK et AC1, la valeur la plus élevée correspond à la pose de déplacement lors du dépôt. Les coefficients Kappa, PABAK et AC1 les plus bas ont été observés à la pose de déplacement du prédépôt.

3.3.3 Application de la taxonomie

Il existe de multiples façons d'utiliser la taxonomie. Les placements terminaux peuvent être évalués individuellement pour se concentrer sur des instants clés ou des phases spécifiques (tableau 3.5). Par exemple, les fréquences moyennes d'utilisation des déplacements (autres classes que celle du non-mouvement) pour chaque instant clé étaient les suivantes : premier contact : 3 %; lever : 50 %; prédépôt : 2 %; et dépôt : 5 %.

La taxonomie peut également être utilisée à la lumière des phases qui composent chaque cycle de MM ainsi que dans des séquences entières (tableau 3.6). Les transitions entre les phases peuvent également être identifiées.

Tableau 3.5. Les principales stratégies (placement et déplacement) pour les quatre instants clés de la tâche de manutention

Instant clé	Stratégie	Code	Fréquence
1er contact	Faces égaux–Fixes (No Movement)	E _{N-M}	49
	Parallèle ipsilatéral–Fixe	I _{N-M}	28
	Pied controlatéral avant–Fixe	S _{N-M}	10
Lever	Faces –Fixes	E _{N-M}	29
	Parallèles, ipsilatéral–Fixes	I _{N-M}	16
	Parallèles, ipsilatéral–pivot&translation	I _{P-T}	15
Prédépôt	Pied ipsilatéral avant–Fixes	R _{N-M}	30
	Pied controlatéral avant–Fixes	S _{N-M}	29
	Faces –Fixes	E _{N-M}	28
Dépôt	Faces –Fixes	E _{N-M}	53
	Pied ipsilatéral avant–Fixes	R _{N-M}	19
	Pied controlatéral avant–Fixes	S _{N-M}	12

Tableau 3.6. Stratégies les plus fréquemment utilisées pour chacune des phases de manutention ainsi que les cinq séquences complètes les plus fréquemment employées

Phase	Stratégie	Code	Fréquence (%)
Préparation	Faces -fixes, Faces -fixes	E _{N-M} , E _{N-M}	26
	Parallèle, ipsilatéral -fixe, Parallèle, ipsilatéral -fixe	I _{N-M} , I _{N-M}	12
	Faces -fixes, Faces -Pivot translation	E _{N-M} , E _{P-T}	12
Transition de lever à transfert	Faces -fixes, Virage progressif	E _{N-M} , T _{Pr}	18
	Parallèle ipsilatérale - Pivot translation-Virage ouvert	I _{P-T} , T _O	15
	Parallèle ipsilatérale -fixe, Virage ouvert	I _{N-M} , T _O	14
Transfert	Virage ouvert	T _O	73
	Virage progressif	T _{Pr}	22
	Crabe	T _{Cr}	2
Transition de transfert à pré dépôt	Virage ouvert, Ipsilatéral pied avant -fixe	T _O , R _{N-M}	25
	Virage ouvert, Controlatéral pied avant -fixe	T _O , S _{N-M}	20
	Virage ouvert, Faces -fixes	T _O , E _{N-M}	20
Dépôt (Abaissement)	Faces-fixes, Faces -fixes	E _{N-M} , E _{N-M}	24
	Controlatéral pied avant - fixe, Faces -fixes	S _{N-M} , E _{N-M}	17
	Ipsilatéral pied avant -fixe, Ipsilatéral pied avant -fixe	R _{N-M} , R _{N-M}	16
Séquence complète	{E _{N-M} , E _{N-M} , Pr, E _{N-M} , E _{N-M} }		5
	{E _{N-M} , E _{N-M} , Pr, S _{N-M} , E _{N-M} }		5
	{E _{N-M} , E _{P-T} , O, S _{N-M} , E _{N-M} }		4
	{E _{N-M} , E _{N-M} , O, E _{N-M} , E _{N-M} }		3
	{E _{N-M} , E _{P-T} , O, R _{N-M} , E _{N-M} }		2

3.4 Discussion

L'objectif de ce chapitre était de classer et de quantifier les déplacements de pieds des Ma avec une nouvelle méthode de classification. Une banque de données existante a été utilisée pour caractériser les stratégies de déplacement des pieds les plus communs des Ma et entre des Ma experts et des Ma novices. Les tests de fidélité intra et interjuge ont été considérés comme satisfaisants. En outre, les résultats montrent que l'on peut observer les différents déplacements effectués à chaque instant clé de la tâche de MM. Ces déplacements peuvent être associés à une compétence de savoir-faire par le Ma.

3.4.1 Fidélité intra et inter juge

Tous les pourcentages de concordance pour la fidélité interjuge étaient suffisants (> 80 %) selon Denis *et al.* (2000). Les coefficients PABAK et AC1 varient respectivement de modérés à quasi parfaits et d'une concordance élevée à un accord quasi parfait. Denis, Lortie et Bruxelles (2002) ont obtenu des résultats relativement similaires dans une classification de mouvements d'une tâche de MM destinée à évaluer l'effet de l'expérience et de la formation des évaluateurs. Dans cette étude, il y avait huit variables catégorielles liées à la position et à l'orientation des pieds. Pour ces variables, les pourcentages de concordance intrajuge variaient de 68 % à 99 %, selon le niveau de formation et de pratique des évaluateurs. Les Kappas passaient de modérées à une concordance quasi parfaite. Pour toutes leurs variables, la moyenne des pourcentages de concordance s'étendait de 82 % à 85 % (selon le niveau de formation) tandis que les kappas atteignaient une concordance élevée. Notre étude présente des résultats similaires à ceux de Denis *et al.* (2002). D'autres études ergonomiques qui n'ont pas évalué les déplacements des pieds ont également obtenu des résultats similaires. Ainsi Palm, Josephson, Mathiassen et Kjellberg (2016) ont estimé la fidélité intrajuge pour l'étude des mouvements du haut du corps dans un emploi de caissier. Dans leur étude, les évaluateurs ont dû compter les occurrences de mouvements spécifiques selon certains critères. Certains mouvements étaient relativement grossiers et d'autres plus fins. Par exemple, les évaluateurs devaient compter le nombre de produits alimentaires manipulés en utilisant les mouvements du poignet (> 15°). Ils devaient également évaluer si les caissiers étaient debout ou assis. En utilisant le coefficient PABAK pour la fidélité des évaluateurs, ils ont obtenu des résultats s'étendant de 0,47 à 1,00. Les auteurs ont considéré ces résultats comme acceptables; ces derniers se situent dans une zone similaire aux résultats de cette étude. À la lumière des résultats d'études antérieures, et de celle de notre étude, il est clair que la fidélité de notre approche apparaît acceptable.

Les pourcentages de concordance entre les évaluateurs étaient adéquats pour les phases de lever et de dépôt. Aucun des autres pourcentages n'a atteint 80 % de concordance, bien que les coefficients d'AC1 étaient élevés entre les évaluateurs (0,71-0,76). Wagner *et al.* (2009) ont obtenu des résultats de concordance moindre en évaluant leur méthode L-TRACS, la pose terminale ainsi que le nombre de pas ($K = 0,326-0,536$). Cela semble indiquer que les observations sont difficiles à réaliser en raison de la complexité de la tâche. Non seulement il existe de multiples choix de postures et de déplacements, mais des chevauchements entre les choix peuvent se produire; un Ma peut se trouver dans une posture qui ne correspond pas à une seule pose, mais à deux ou trois à la fois. Bien que la taxonomie aborde cette difficulté, les évaluateurs peuvent devenir confus. De plus, les Ma peuvent utiliser de nombreuses stratégies différentes. Bien que les tâches puissent être répétitives, les stratégies ne sont pas nécessairement similaires. Par conséquent, les multiples possibilités d'interprétation des

différents mouvements peuvent entraîner des erreurs lors du processus de classification. Le moment auquel chaque phase se produit pourrait également avoir causé des divergences entre les évaluateurs. En particulier, l'instant du prédépôt apparaît difficile à évaluer, en raison de ses multiples critères qui la définissent.

Les coefficients de fidélité interjuge étaient inférieurs à ceux intrajuge, un résultat qui a été également mentionné par Denis *et al.* (2000). Une première cause pour laquelle il est possible d'attribuer ce résultat est que la formation du second évaluateur à l'apprentissage de taxonomie n'a peut-être pas été optimale. La taxonomie a été enseignée de façon détaillée, toutefois, les exemples visuels utilisés peuvent ne pas avoir représenté de manière adéquate et complète les poses de placements ou de déplacements. En outre, il n'y a eu qu'une seule session d'enseignement de sorte que l'expérience de l'évaluateur était limitée. Cette limitation a pu altérer l'interprétation globale des poses adoptées par les Ma. Aussi, les critères permettant d'identifier correctement chaque instant clé ainsi que chacune des poses ont été enseignés en profondeur. Cependant, il n'y avait pas de procédure pour tester la compréhension de la taxonomie par le second évaluateur. Ainsi, il n'y avait aucun moyen de vérifier s'il y avait ou non un biais de compréhension. Une deuxième cause pourrait être attribuable au niveau d'expérience du premier évaluateur. Le premier évaluateur a passé au travers de toutes les données alors que le deuxième n'en a observé que 10 %. Par conséquent, ce dernier peut ne pas avoir évalué les données de la même manière.

3.4.2 Bénéfices de la taxonomie

Cette taxonomie a été développée pour évaluer les poses de placements et de déplacements des pieds à quatre instants clés ainsi que lors de la phase de transfert de la charge. L'évaluation des stratégies des déplacements des pieds des Ma est peu connue et ne pas en tenir compte constitue une perte d'information importante utile pour des formations. Ainsi, Authier *et al.* (1996) ont décrit les placements des pieds comme un paramètre important des études ergonomiques portant sur les Ma. Par exemple, certains Ma ne se tiennent pas nécessairement de face à la charge à soulever lors de la prise. La nouvelle taxonomie non seulement reproduit la méthode de Wagner *et al.* (2009) et de Wagner *et al.* (2010) pour ce qui concerne le placement des pieds, mais en plus décrit de manière plus exhaustive les déplacements des pieds. Il est alors possible d'évaluer si les pieds du travailleur sont statiques ou encore en déplacement à des moments clés du transfert de la caisse. Nos résultats ont indiqué que les Ma bougeaient leurs pieds dans 50 % des transferts lors de la phase de lever. La phase de transfert est également importante à prendre en compte, comme le soulignent Delisle *et al.* (1999) qui ont démontré que les déplacements des pieds pendant le transfert d'une boîte ont un impact sur l'asymétrie de la posture. Notre taxonomie indique que le principal déplacement observé durant la phase de transfert sont des virages ouverts (environ trois essais sur quatre). Ces virages ouverts sont effectués à partir de différentes positions initiales (Faces -fixes, Parallèle ipsilatérale - Pivot translation, Parallèle ipsilatérale - fixe). Ces résultats montrent l'importance du rôle joué par la pose de placement et de déplacement au soulèvement et de son lien possiblement étroit avec le niveau d'asymétrie du geste pendant le transfert de la charge.

Les résultats de notre étude montrent également que les déplacements se produisent rarement lors du premier contact, du prédépôt et du dépôt. Pour certains de ces instants clés, les coefficients de concordance des éléments de la pose sont parmi les plus faibles. Il serait alors possible d'alléger la taxonomie en prévoyant moins d'éléments clés à évaluer bien que cette solution pourrait conduire à une perte de précision pour certains types de déplacements.

Un avantage supplémentaire à la présente taxonomie est qu'elle permet aux utilisateurs d'évaluer la stratégie du Ma dans l'ensemble du cycle de la tâche. La méthode de Wagner *et al.* (2009) est davantage orientée vers la description de chaque pas sans fournir d'information sur l'instant précis du pas. Comme le démontrent Authier *et al.* (1995) et Authier *et al.* (1996), la décomposition de la tâche en plusieurs segments permet d'évaluer les stratégies des Ma à chaque étape de la tâche. L'instant du premier contact avec la charge dévoile la stratégie du travailleur pour préparer le lever.

Une stratégie (séquence) fréquemment adoptée par les Ma lors du lever était la suivante {parallèle, ipsilatérale, pivot-translation}, suivie d'un {tour ouvert}. Dans cet exemple, la pose {Parallèle, ipsilatérale} était favorable à une transition rapide puisque les pieds étaient orientés vers le lieu de dépôt, contrairement à une position faisant face au lieu de soulèvement et qui ont nécessité quelques pas additionnels durant le transfert de la charge. De plus, le déplacement {pivot-translation} est suivi d'un {tour ouvert}. Cela indique que les Ma ont commencé à se déplacer vers le lieu de dépôt au moment du soulèvement de la charge plutôt que pendant la phase de transfert. Cette stratégie affiche une certaine fluidité dans la succession des mouvements pendant la MM (Authier *et al.*, 1995; Denis *et al.*, 2013; Lortie, 2002). Un autre exemple qui est très différent de l'exemple précédent serait un {pieds faces, pas de mouvement} suivi d'un {tour ouvert}. Dans ce cas, les Ma choisissent plutôt un type de lever plus symétrique et un transfert plus lent pour assurer possiblement une symétrie de posture durant le soulèvement de la charge et réduire les risques de déséquilibre du corps lors de manutention de la charge (Authier *et al.*, 1995; Denis *et al.*, 2013; Lortie, 2002). Les instants de prédépôt et de dépôt fournissent des informations sur les stratégies d'abaissement de la charge. Comme pour les phases de préparation et de transition, les Ma peuvent favoriser une descente plus rapide ou plus progressive. Par exemple, une des stratégies utilisées est la suivante : {pied controlatéral devant - pas de mouvement} à l'arrivée; et {pieds faces - pas de mouvement} au dépôt. Dans ce cas, aucun mouvement n'est effectué aux instants clés, mais le placement des pieds passe du pied controlatéral devant à un placement {pieds faces}. Cela suggère que les Ma se déplaçaient encore (en mouvement) pendant la descente de la charge, reflétant une certaine fluidité dans leurs déplacements. La prise en compte de ces instants clés aide les chercheurs à tirer des conclusions sur des stratégies de déplacement utilisées par les Ma.

3.4.3 Limites de la taxonomie

Cette taxonomie a été développée pour être applicable à un large éventail de contextes de travail. Cependant, elle était basée sur l'observation d'une seule tâche de MM. Plus précisément, la position du lieu de prise par rapport au lieu de dépôt (180 °) était la même pour chaque observation. C'est un facteur important à considérer puisque les stratégies de positionnement des pieds en dépendent (Authier *et al.*, 1996).

Une autre limitation porte sur le fait que les Ma ont réalisé la tâche dans un contexte de laboratoire. Toutefois, les Ma n'ont reçu aucune instruction sur la manière d'accomplir la tâche.

Malgré tout, le contexte du laboratoire pourrait avoir affecté la manière dont ils ont effectué la tâche de MM. Les sujets avaient également des plaques de marqueurs DEL Optotrak attachées sur leur corps, ce qui a pu interférer avec leurs mouvements. En outre, le manque de familiarité avec les installations du laboratoire peut avoir influencé leurs comportements (Faber, Kingma et van Dieën, 2011). Aussi, les caméras n'ont pas été positionnées de manière à voir les pieds des Ma pendant la tâche. Par conséquent, au moins un des pieds était à peine visible, car il était caché par l'autre pied la plupart du temps. L'obscurité dans la pièce a également rendu l'observation plus difficile. Malgré cela, les résultats ont montré une bonne fidélité intra et interjuge.

Une limite supplémentaire que connaît cette taxonomie est que les poses de déplacement ne révèlent pas toujours si le pied en mouvement est ipsilatéral ou controlatéral par rapport au sens de rotation, sauf pour le mouvement de {pivot-translation}. Aucun {Pivot-translation} n'a été observé pour le pied controlatéral pendant les observations. À la place, ils ont été classés comme {Pivot} ou {translation arrière}. La raison de cette limitation en est une de simplification. Considérant le fait que le pied en déplacement soit ipsilatéral ou non aurait entraîné possiblement presque deux fois plus de poses de déplacements. Afin de réduire le nombre de classifications, nous avons donc choisi de ne pas considérer ce paramètre.

3.5 Conclusion

Dans ce document, une taxonomie basée initialement sur la méthode de Wagner *et al.* (2009) et de Wagner *et al.* (2010) a été développée permettant d'évaluer les placements et les déplacements des pieds sur une tâche de manutention de la prise au dépôt d'une charge. Cette méthode a montré une fidélité intrajuge suffisante et une fidélité interjuge modérée. Enfin, elle repousse les limites des méthodes existantes en considérant la pose des pieds par rapport à l'environnement et leurs déplacements. Elle tient également compte des instants clés d'une tâche de manutention pour mettre en relief les différentes stratégies des Ma, fournissant ainsi des points de repère pour mieux les comprendre. Enfin, la taxonomie permet une évaluation plus précise des stratégies de déplacement des pieds dans les études en manutention. Une meilleure compréhension de ces stratégies pourrait aider à améliorer la formation des travailleurs.

4. DIFFÉRENCE ENTRE EXPERTS ET NOVICES DANS LES STRATÉGIES DE DÉPLACEMENTS DES PIEDS DURANT UNE TÂCHE DE MANUTENTION

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent (chapitre 3), une approche améliorée pour évaluer les déplacements des pieds des manutentionnaires (Ma) a été présentée et la suite logique consiste à l'appliquer sur l'étude de déplacements de Ma. Par conséquent, l'objectif principal de ce chapitre était d'utiliser la taxonomie du chapitre 3 pour caractériser les placements et les déplacements des pieds chez les experts et les novices. Un objectif secondaire était d'associer différentes stratégies de pas sur le chargement lombaire à différents instants clés de la tâche de MM. En se basant sur les études d'experts en manutention manuelle (MM) (Authier *et al.*, 1995; Authier *et al.*, 1996; Denis *et al.*, 2013), il est supposé que ces experts se déplacent de manière différente des novices. Ils placeraient leurs pieds parallèlement à la palette pendant la saisie de caisse, mais cette stratégie pourrait accroître les moments asymétriques au dos (Delisle *et al.*, 1999). D'un autre côté, l'exécution de pas plus petits pendant le transfert pourrait réduire les moments asymétriques (Authier *et al.*, 1996).

4.2 Méthode

Les données de cette étude ont été tirées des travaux de Plamondon *et al.* (2010) et de Plamondon *et al.* (2014).

4.2.1 Participants

Deux groupes de 15 participants masculins ont été recrutés. Le premier groupe était composé d'experts en MM. Les sujets devaient avoir au moins 5 ans d'expérience en MM et être recommandés par leurs pairs, la direction ou le syndicat. Ils devaient également avoir un faible taux de blessures à vie, en particulier pour le dos. Le second groupe était composé de 15 novices ayant 3 à 6 mois d'expérience professionnelle dans la manutention manuelle. Le tableau 4.1 présente les principales caractéristiques anthropométriques des participants

Tableau 4.1. Caractéristiques anthropométriques des participants (n=30) de chaque groupe (adapté de Plamondon *et al.*, 2010)

Variables	Experts		Novices		P**
	M*	SD*	M*	SD*	
Age (années)	38,0	9,8	25,0	5,9	< 0,01
Poids (kg)	75,9	12,2	74,2	11,4	0,70
Taille (m)	1,71	0,07	1,75	0,05	0,09
Expérience (années)	15,4	9,3	0,5	0,4	< 0,01

P** : comparaison des moyennes (valeur p) à l'aide d'un test t bilatéral non apparié.

Tous les participants ont donné leur consentement éclairé au moyen d'un formulaire approuvé par le comité d'éthique de l'Université de Sherbrooke (Faculté de médecine et des sciences de la santé).

4.2.2 Équipements

Les données cinématiques ont été recueillies à l'aide de diodes LED infrarouges et de quatre colonnes Optotrak (Northern Digital Inc., Waterloo, Ontario) à un taux d'échantillonnage de 30 Hz. Trois caméras vidéo ont été utilisées pour filmer la tâche afin de compléter et de valider les données du système Optotrak et de permettre de faire des analyses ergonomiques lors du post-traitement. Les données cinétiques ont été saisies à l'aide d'une plateforme de force de 1,9 m x 1,3 m fabriquée à l'interne et montée sur six mini platesformes (modèle MC3A-6-1000; Advanced Mechanical Technology Inc., Watertown, MA, USA). Tous les instruments ont été synchronisés à l'aide d'un système Horita, FP-50 (Mission Viejo, CA, USA)

4.2.3 Protocole expérimental

La tâche consistait à transporter 24 caisses de 15 kg d'une palette à l'autre (Plamondon *et al.*, 2010; Plamondon *et al.*, 2014).

La fatigue générale et musculaire a été évaluée à l'aide de l'échelle CR-10 de Borg (Borg, 1982) entre les séries à cadence libre et imposée et à la fin de l'expérience. Il n'y avait pas d'ordre dans lequel les caisses devaient être saisies ou déposées. Les participants avaient reçu l'instruction d'utiliser les techniques de MM qu'ils utilisaient normalement au travail et de rester sur la plateforme de force à tout moment. Aucune autre instruction ne leur avait été donnée sur la manière de procéder pendant la tâche.

4.2.4 Traitement et analyse des données

Les participants ont été instrumentés de manière à utiliser un modèle dynamique 3D segmentaire qui nécessite 12 groupes de marqueurs rigides fixés sur les segments suivants : tête, C7, T12, S1, les deux bras, les deux avant-bras, les deux cuisses et les deux pieds. La méthode elliptique de Jensen (1978) a été utilisée pour déterminer les paramètres anthropométriques inertiels des segments du corps. Les déplacements angulaires 3D ont été estimés au moyen de la méthode de Grood et Suntay (1983). Les forces de réaction au sol ont été mesurées à l'aide de la plateforme de force. Les données ont ensuite été utilisées pour calculer les moments nets à l'articulation L5/S1 selon la méthode de Hof (1992). Seuls les derniers allers de chaque cadence (libre et imposée) ont été analysés.

Les analyses des stratégies des pas ont été effectuées en divisant la tâche en quatre instants clés et une phase de transfert en utilisant la taxonomie du chapitre 3. La taxonomie décrit les stratégies des pieds en attribuant une pose de placement et une pose de déplacement des pieds à chacun des quatre instants. Pour la phase de transfert, seule une pose de déplacement est attribuée. La combinaison de la pose de placement et (ou) celle de déplacement pour un instant clé ou une phase est appelée position terminale. Les quatre placements terminaux et la pose pour la phase de transfert qui composent un essai sont appelés une séquence. Cette taxonomie a été appliquée sur 1 794 transferts de caisses (~ 60 par participant) à partir des données vidéo.

4.2.5 Variables dépendantes biomécaniques

Les moments à L5/S1 en flexion sagittale et en asymétrie (somme vectorielle des composantes de flexion latérale et de torsion) ont été calculés aux instants clés de lever et de dépôt en fonction de la hauteur de la caisse (ou de dépôt). Les valeurs de moments ont été groupées et la moyenne a été calculée en fonction des poses correspondantes pour chaque instant clé. Par exemple, tous les moments générés à l'instant du lever de caisse ont été mis en commun et la moyenne a été calculée lorsque la pose était du même type : {pose pieds faces égaux}. Les moments nets moyens ont été calculés pour les positions suivantes : {pose pieds faces égaux}, {pied ipsilatérale, parallèle}, {pied ipsilatéral en avant} (dépôt direct seulement) et {pied controlatéral en avant}. Toutes les autres positions ont été écartées en raison de leur absence ou de leur faible fréquence d'utilisation.

Les moments cumulés en flexion sagittale et en asymétrie à L5/S1 ont également été calculés pour la durée d'envol de la caisse. Les moments ont été cumulés du soulèvement à la moitié de la durée d'envol. Cette approche a été privilégiée parce que l'emplacement du dépôt de chaque boîte est un choix du participant et n'a donc pas été contrôlé dans le cadre de l'expérience. Les valeurs cumulées des moments ont été groupées et la moyenne a été calculée en fonction de leur pose de déplacement respective. Les moments cumulés moyens ont été calculés pour les rotations {Ouvverte} et {Progressive}. Tous les autres types de rotation ont été écartés en raison de leur absence ou de leur faible fréquence d'utilisation. Les moments pour chaque instant clé et chaque phase ont été normalisés par le moment du haut du corps (Plamondon, Denis *et al.* 2012; annexe D p.86) afin d'éliminer l'effet du poids du corps sur les charges à L5/S1. De cette façon, seul l'effet des stratégies de pas sur les chargements à L5/S1 est pris en compte dans cette analyse.

4.2.6 Analyses statistiques

La comparaison de moyennes entre les conditions a été effectuée avec la méthode nparLD (Noguchi, Gel, Brunner et Konietzschke, 2012). La procédure nparLD (R 3.6.2, package nparLD 2.1) est une méthode statistique non paramétrique comparable à l'analyse de variance à mesures répétées. Elle a été spécifiquement développée pour fonctionner avec de petits échantillons mesurés par une variable dépendante d'échelle minimale de type ordinal. Il n'y a aucun prérequis quant au type de distribution qui peut notamment varier entre les conditions. Basée sur l'analyse des rangs, cette procédure est particulièrement robuste à l'égard des valeurs extrêmes (outliers). Elle gère bien les données manquantes sans exclure de participants ou avoir à imputer ces données. Elle n'a aucun prérequis quant à la nature de la matrice des covariances entre les mesures répétées (Noguchi *et al.*, 2012). Pour chaque condition de l'interaction la plus élevée, nparLD calcule un effet de traitement relatif (RTE) qui se situe entre 0 et 1 avec 0,5 comme valeur attendue de l'hypothèse nulle. Les valeurs RTE supérieures à 0,5 indiquent une probabilité supérieure au hasard qu'un score tiré au hasard de cette condition spécifique ou de cette population soit supérieur à un score tiré dans tout autre ensemble de données (autres conditions ou autres populations). À l'inverse, les valeurs RTE inférieures à 0,5 indiquent une probabilité supérieure au hasard qu'un score tiré au hasard soit inférieur à un score tiré dans tout autre ensemble de données. Les RTE situés dans les limites {0,44, 0,56} ne sont pas vraiment considérés comme inférieurs ou supérieurs à la valeur de 0,5. Les tailles d'effet (effect size) peuvent être considérées moyennes lorsqu'un RTE est entre {0,29, 0,36} ou {0,64, 0,71}, et élevées lorsqu'un RTE est inférieur à 0,29 ou supérieur à 0,71 (Vargha et Delaney, 2000).

La procédure nparLD a été appliquée parce que la fréquence d'utilisation de chaque stratégie de placement et de déplacement diffère selon les sujets. En outre, les niveaux des mesures répétées sont interdépendants. Plus la fréquence d'utilisation d'une stratégie augmente, plus la fréquence des autres stratégies diminue.

L'expertise a été considérée comme variable indépendante dans le modèle statistique. Aussi, pour chaque instant clé, le nparLD a été utilisé pour comparer les moments sagittal et asymétrique moyens à L5/S1 pour les positions suivantes : {CC}, {Pied controlatéral en avant}, {Pied ipsilatéral en avant} et {Parallèle, ipsilatéral}. Les moments ont également été comparés pour les rotations {Ouvertes} et {Progressives} de la phase de transfert.

La variabilité des différentes stratégies adoptées par le participant a également été comparée entre les experts et les novices. Un indice de constance (C) a été élaboré sur la base de la somme des valeurs carrées de la fréquence des stratégies :

$$C = \sum_{i=1}^n s_i^2 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 \dots s_n^2$$

Dans laquelle n est le nombre de différentes stratégies et s est le pourcentage d'utilisation de la $j^{\text{ème}}$ stratégie. Voici un exemple de l'application de la formule :

$$C = \sum_{i=1}^n s_i^2 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + s_4^2 \dots s_n^2$$

$$C_{\#1} = 0.20^2 + 0.20^2 + 0.20^2 + 0.20^2 + 0.20^2 = 0.20$$

$$C_{\#2} = 0.90^2 + 0.10^2 + 0.0^2 + 0.0^2 + 0.0^2 = 0.82$$

Dans cet exemple, il existe cinq stratégies différentes ($n = 5$) qui peuvent être utilisées par les deux Ma. Le premier (#1) a utilisé chacune des stratégies de manière égale; le second (#2) n'a essayé que la première et la seconde stratégie sur 90 % et 10 % des essais, respectivement, et n'a pas choisi d'autres stratégies. Le premier Ma, favorisant une approche plus variable, a obtenu un indice de constance de 0,20 tandis que le second a obtenu 0,82. Par conséquent, un indice plus élevé indique un comportement plus constant tandis qu'un résultat plus faible indique l'opposé. L'indice le plus faible dépend du nombre de stratégies disponibles ($n/100$), ce qui empêche les indices d'être comparables entre les poses de placements et celles de déplacements, car il existe cinq poses de placement et six de déplacements. Les indices de constance ont été comparés en utilisant un modèle ANOVA mixte pour les poses de placement et celles de déplacement. La variable intrasujet était les instants clés (contact, lever, prédépôt et dépôt); la variable intersujet était l'expertise (experts et novices). Les indices de la phase de transfert ont été comparés à l'aide d'un test t indépendant pour comparer les deux groupes de participants. Le seuil de signification a été établi à 0,05.

4.3 Résultats

Des différences ont été constatées entre les différentes fréquences d'utilisation des stratégies ($p < .001$) (figure 4-1, tableau 4.2). Ces différences sont présentes à chaque instant clé, tant pour les novices que pour les experts. Pour les deux groupes, la pose {CC} était la position privilégiée à tous les instants, sauf au moment du prédépôt. À l'opposé, la pose {parallèle, controlatérale}

était la stratégie la moins fréquente, tant pour les novices que pour les experts. Dans le seul cas du prédépôt, cette dernière pose n'était pas significativement inférieure à toutes les autres poses. Pour les poses de déplacement (figure 4-2, tableau 4.2) les fréquences d'utilisation à chaque instant étaient les suivantes : premier contact : 3 %, lever : 50 %, prédépôt : 2 % et dépôt : 5 %. La stratégie préférée (et la plus utilisée) des deux groupes était la pose {fixe}. Pour la phase de transfert {rotation ouverte} a une probabilité plus élevée d'être utilisée que les autres stratégies. Bien que moins fréquente, la {rotation progressive} a néanmoins une probabilité d'être utilisée plus que le {crabe}, le {pivot} et le {fixe}. Enfin, la pose avec une probabilité plus faible d'être employée par les Ma a été la pose {fixe}.

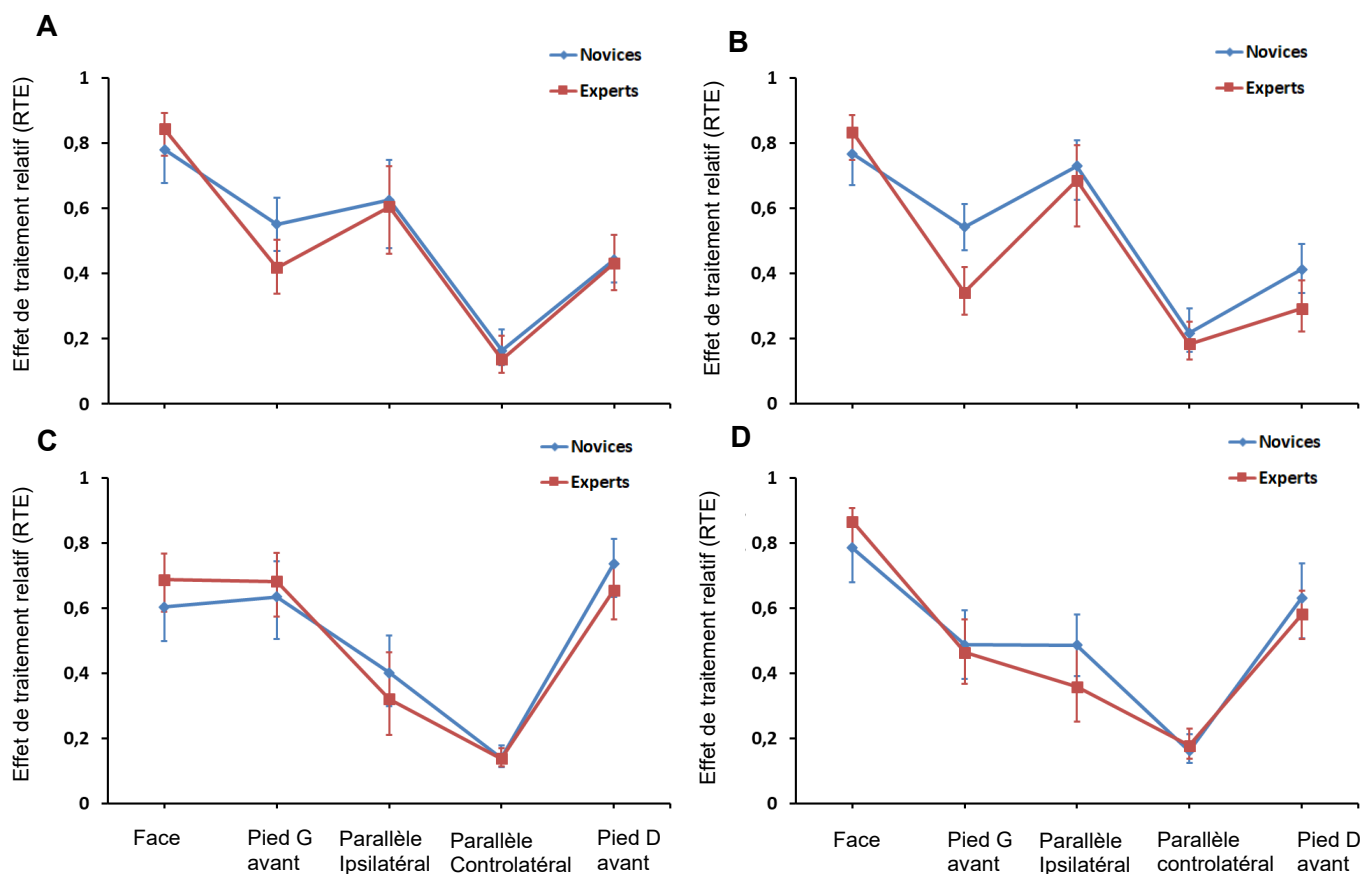


Figure 4-1. Effet de traitement relatif (RTE) sur des intervalles de confiance (95 %) pour la fréquence d'utilisation des cinq poses de placement aux instants clés suivants : Premier contact (A); Lever (B); Prédépôt (C); et Dépôt (D).

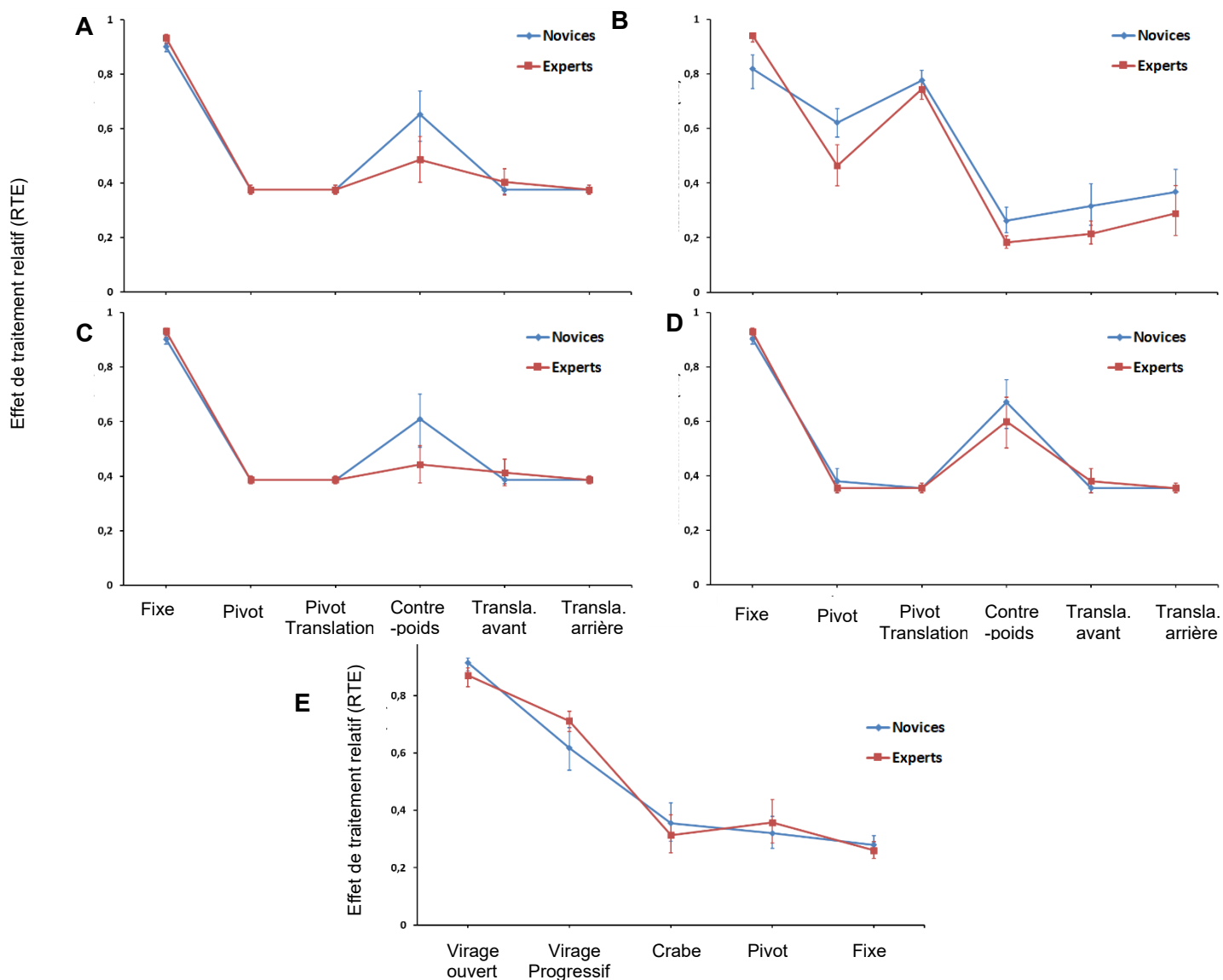


Figure 4-2. Effet de traitement relatif (RTE) sur des intervalles de confiance (95 %) pour la fréquence d'utilisation des cinq poses de déplacement aux instants clés suivants : Premier contact (A); Lever (B); Prédépôt (C); et Dépôt (D); ainsi que pour la phase de transfert (E).

4.3.1 Comparaison des stratégies entre experts et novices

L'effet de l'expertise s'est avéré significatif sur la fréquence d'utilisation des différentes stratégies des pieds seulement au moment du soulèvement ($p < 0,05$). L'effet principal de l'expertise ne s'est produit que très peu souvent (tableau 4.2, figure 4-1). La pose {Pied controlatéral en avant} a une probabilité plus faible d'être utilisée par les experts tandis que celle {Pied ipsilatéral en avant} a tendance ($p = 0,06$) au contraire à être plus utilisée par les experts. Quoique non significatifs, les experts ont tendance à être plus souvent de face (pieds faces) à la palette de lever que les novices.

En ce qui concerne les poses de déplacement, des différences entre les novices et les experts ont été constatées à l'instant du lever. Pour tous les instants, la pose {fixe} est la plus souvent utilisée par les experts comparativement aux novices et on constate une différence significative lors du lever ($p < 0,001$). En contrepartie, les novices utilisent la pose {pivot} plus souvent que les experts ($p = 0,005$). Pour l'instant du prédépôt, on observe une tendance chez les novices à utiliser plus souvent le {Contrepoids} ($p = 0,051$). Pour la phase de transfert, il n'y a pas de différences entre les novices et les experts en ce qui concerne l'utilisation de la stratégie.

Tableau 4.2. Fréquences moyennes (ET) des poses de placement et de déplacements aux instants clés, ainsi que les déplacements en phase de transfert exprimés en pourcentages d'utilisation

Poses de placement												Valeur P			Post hoc		
	Pieds faces égaux (E)		Pied controlatéral en avant (S)		Pied ipsilatéral en avant (R)		Pieds parallèles ipsilatéral (I)		Pieds parallèles controlatéral (C)			Expert	Strat.	E × S	Stratégies		
	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice							
Contact	55(28)	44(27)	9 (8)	16(13)	9 (9)	9 (10)	27 24)	30(30)	1 (3)	1 (3)		0,33	<0,001	0,39	E>I>S,R>C		
Lever	56(32)	44(31)	3 (3)	12(13)	3 (8)	6 (8)	37(29)	37(31)	1 (4)	1 (3)		0,02	<0,001	0,07	E,I>S>R>C		
Prédépôt	31(16)	25(18)	32(19)	28(20)	27 (13)	35(18)	10(17)	12(16)	0,4(1)	0,4 (1)		0,58	<0,001	0,42	E,,S,R>I>C		
Dépôt	60(26)	46(30)	12(15)	14(17)	18 (11)	27(21)	10(17)	13(16)	1 (1)	0,3 (1)		0,46	<0,001	0,31	E>R>S,I,>C		
Poses de déplacement																	
	Fixe (N)		Pivot (P)		Pivot translation (P _T)		Contrepoids (C)		Translation avant (F _T)		Translation arrière (B)			Expert	Strat.	E × S	Stratégies
	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert				
Contact	99 (3)	96 (7)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (2)	4 (7)	0,3(1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0,14	<0,001	0,02		N>C>F _T ,P,P _T ,B
Lever	59 (9)	41(16)	7 (7)	16(13)	31 (12)	37(15)	0 (0)	1 (1)	0,2(1)	2 (3)	3 (8)	4 (5)	<0,001	<0,001	0,004		N>P _T >P>B,F _T B>C
Prédépôt	99 (4)	97 (3)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (4)	3 (3)	0,1(0,4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0,06	<0,001	0,01		N>C>F _T ,P,P _T ,B
Dépôt	97 (4)	93(10)	0 (0)	0,1(0,4)	0 (0)	0 (0)	3 (4)	7 (10)	0,1(0,4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0,55	<0,001	0,32		N>C>P,F _T ,B,P _T
Phase de transfert																	
	Tour ouvert (O)		Tour progressif (Pr)		Crabe (Cr)		Pivot (P)		Fixe (N)			Expert	Strat.	E × S	Stratégies		
	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice	Expert	Novice							
	67(20)	80(15)	27(18)	17(15)	2(7)	3(8)	3(11)	0,4(1)	0(0)	0,1(0,4)		0,77	<0,001	0,14	O > Pr > Cr, P>I		

4.3.2 Effet de l'expertise et des stratégies sur les moments

L'effet de la stratégie sur les moments cumulés a été significatif pour tous les instants, ainsi que pour le transfert (tableau 4.3). Au lever, les moments en sagittal sont significativement plus élevés ($p = 0,02$) avec les poses {pied controlatéral en avant} et {pieds faces} comparativement à la pose {parallèle, ipsilatérale}. Les tailles d'effet pour {pied controlatéral en avant} (RTE = 0,57) et {pieds faces} (RTE = 0,56) sont considérées faibles, alors qu'on peut la considérer moyenne pour la pose {parallèle, ipsilatérale} (RTE = 0,35) (figure 4-3). Pour les moments asymétriques, ces derniers sont significativement plus faibles avec la pose {pieds faces} ($p < 0,01$). On observe également ce phénomène au dépôt ($p < 0,05$). La taille d'effet est considérée moyenne pour pieds de face (RTE = 0,32) et pour les deux autres poses (RTE = 0,60 pour la pose {pied controlatéral en avant} et 0,61 pour {pieds parallèles}). Durant le transfert, les moments en sagittal sont plus élevés lors d'un tour {Progressif}, comparativement à un tour {Ouvvert}. En contrepartie, la stratégie n'aurait pas eu d'effet sur le cumul asymétrique. La taille d'effet est élevée pour les moments symétriques du {tour progressif} (RTE = 0,71) et moyenne pour le {tour ouvert} (RTE = 0,31).

L'effet d'expertise s'est avéré significatif pour les moments asymétriques au moment du lever seulement. Pour la pose {Pied controlatéral en avant}, les moments sont significativement plus élevés chez les novices ($p = 0,048$).

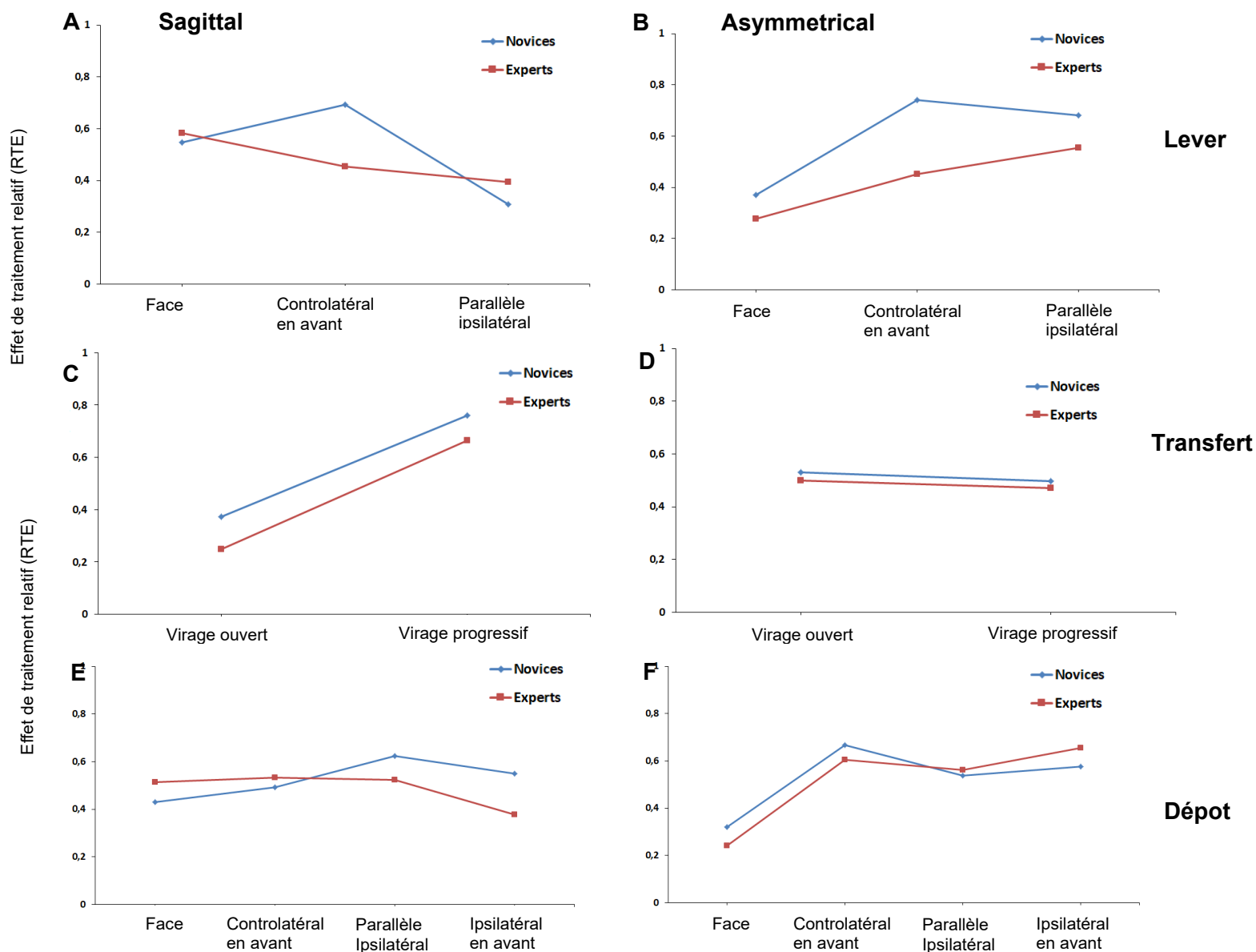


Figure 4-3. Effet de traitement relatif (RTE) sur le moment sagittal et le moment asymétrique à L5/S1 pendant le lever, et le dépôt, ainsi que sur le moment sagittal cumulé pendant la phase de transfert.

4.3.3 Comparaison de la variabilité entre experts et novices

Des différences significatives sont observées entre les indices de constance des différents instants clés durant la manutention de placement et de déplacement (tableau 4.4). Pour les poses de placements, l'indice de constance des poses est plus élevé lors de la prise comparativement aux autres instants ($p < 0,01$) (figure 4-4). On note toutefois une exception au dépôt. Pour cet instant, l'indice de constance des poses aurait tendance à être plus faible qu'à la prise ($p = 0,053$). Également, l'indice de constance des poses au dépôt ne différencierait pas significativement de celui du premier contact ($p = 0,95$). Enfin, l'instant du prédépôt serait celui pour lequel l'indice de constance des poses de placement serait le plus faible.

Pour les indices de constance des poses de déplacement, on observe une différence significative entre les instants ($p < 0,05$), sauf entre le premier contact et le prédépôt ($p = 0,48$). Ces deux instants sont ceux pour lesquels les indices de constance sont les plus élevés (figure 4-4). En contrepartie, on note que l'indice de constance des poses de déplacement pour le lever est le plus bas.

Tableau 4.4. Indice de constance des poses de placement et de déplacement chez les novices et les experts

	NOVICE		EXPERT		P VALUE		
	Mean	SD	Mean	SD	Instant	Expertise	Instant x Expertise
PLACEMENT	0,485	0,036	0,521	0,036	> 0,001	0,478	0,462
DÉPLACEMENT	0,789	0,012	0,843	0,012	> 0,001	0,004	0,603
TRANSFERT	0,712	0,176	0,612	0,145	-	0,1	-

L'effet d'expertise ne s'est pas avéré significatif pour l'indice de constance des poses de placement et au niveau du transfert (tableau 4.4). Néanmoins, on observe un effet significatif de l'expertise sur l'indice de constance des poses de déplacement : étant plus élevé chez les experts que les novices. De façon générale, l'indice de constance des poses de déplacement est plus faible chez les novices que les experts à chaque instant du cycle de manutention.

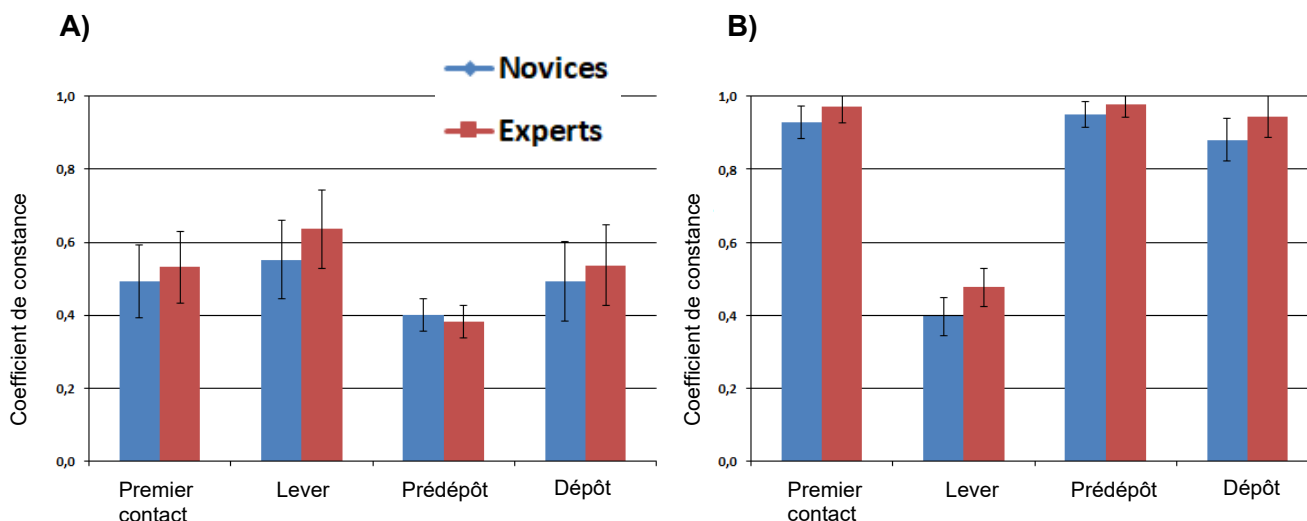


Figure 4-4. Coefficients de constance des placements (A) et des déplacements (B) pendant les quatre instants clés de la tâche de manutention pour les novices et les experts.

4.4 Discussion

4.4.1 La fréquence d'utilisation des stratégies

Des stratégies différentes ont été observées entre les novices et les experts. Pour les poses de placements, les différences ont été observées à l'instant du lever. Les experts ont généralement tendance à faire face plus souvent à la palette de lever que les novices. De plus, les experts ont effectué moins de déplacement des pieds que les novices. Ces résultats n'ont toutefois pas été corroborés par Authier *et al.* (1995) qui ont observé que les pieds des experts étaient généralement orientés vers le lieu de dépôt afin de minimiser les changements de direction durant le transfert de caisse. Le contexte de travail observé dans la présente étude était possiblement peu propice à ce type de placement des pieds considérant la distance entre les lieux de soulèvement et de dépôt et de multiples combinaisons de hauteurs lever-dépôt. Les experts semblent aussi favoriser l'alignement du corps, la symétrie et l'équilibre postural, tout comme le soulignent certaines études (Lortie, 2002; Denis *et al.*, 2013). Au contraire, les novices ont adopté une approche plus mobile et plus variable puisqu'ils se sont déplacés plus souvent en soulevant des boîtes. Les stratégies des experts pourraient être associées à la distance du lieu de dépôt. Comme la palette de dépôt était relativement éloignée et qu'ils doivent se retourner complètement par rapport à la palette de prise, ils ont adopté une technique qui réduit l'asymétrie de posture et qui semble assurer un meilleur équilibre du corps.

Pour la phase de transfert, le {virage ouvert} était plus souvent réalisé par les novices et le {virage progressif} par les experts. Aussi, comme les participants devaient effectuer un virage de 180 ° entre le lever et le dépôt, des pas plus petits étaient privilégiés pour assurer l'équilibre pendant le transfert. Cela concorde avec les résultats de Authier *et al.* (1996) qui soulignaient que les experts effectuaient des pas plus courts que les novices pendant le transfert de caisses lors d'une tâche de transfert de 16 caisses.

4.4.2 La variabilité dans l'utilisation des stratégies

Les résultats montrent que l'indice de constance des poses de déplacement est significativement plus faible chez les novices que les experts. Par conséquent, les novices ont été plus variables dans leur utilisation de stratégies de mouvements. Des études précédentes ont démontré que les experts avaient une plus grande variabilité que les novices (Granata *et al.*, 1999; Madeleine, Lundager, Voigt et Arendt-Nielsen, 2003; Madeleine, Voigt et Mathiassen, 2008). Cette plus faible variabilité dans l'utilisation des stratégies des experts pourrait alors s'expliquer par le contexte de manutention. Il apparaît que les experts peuvent adapter leurs méthodes en fonction du contexte de travail (Denis *et al.*, 2013). L'orientation à 180° et la distance entre la palette de prise et la palette de dépôt pourraient inciter les experts à adopter une stratégie sécuritaire. D'un autre côté, dans un tout autre contexte de travail, les experts pourraient favoriser de travailler avec plus de variabilité afin de prévenir l'apparition de la fatigue (Madeleine *et al.*, 2003; Madeleine *et al.*, 2008). Les novices auraient cependant pu essayer d'adopter différentes stratégies pour ralentir l'apparition de cette fatigue (Srinivasan et Mathiassen, 2012).

L'instant du cycle de manutention influence également significativement l'indice de constance. Ce résultat pourrait être causé par la nécessité de bouger qui change dépendamment de l'instant. Par exemple, au premier contact, le manutentionnaire saisit une caisse. Cette action nécessiterait relativement peu de déplacement de pieds. À l'instant du lever, l'action de supporter le poids de la caisse à différentes hauteurs sont des facteurs qui auraient encouragé les Ma à changer de stratégie entre les essais. De plus, à cet instant débute la phase de transfert et le déplacement du pied pourrait être une tentative de combattre l'inertie de la boîte pendant le lever (Authier *et al.*, 1995). Cela expliquerait la plus grande variabilité et la présence de déplacements pendant l'instant de lever. Il est possible que les Ma aient initié la phase de transfert en utilisant différentes stratégies de déplacement entre les essais, en fonction de la hauteur de la boîte ou de sa position sur la palette.

4.4.3 Les effets de la stratégie des pieds sur le chargement lombaire

L'effet de la stratégie a eu un impact significatif à chaque instant du cycle de manutention. À l'instant du lever, la pose {parallèle, ipsilatérale} est celle pour laquelle les moments en sagittal étaient les plus faibles. Les résultats d'une précédente étude sur l'impact du placement des pieds sur les moments concordent avec celui de cette étude (Zhou *et al.*, 2013). Dans les conditions où le participant faisait face à sa charge, les moments maximaux étaient les plus grands. En contrepartie, la pose {pieds faces} était celle où les moments asymétriques étaient les plus faibles comparativement aux autres stratégies de positionnement. Cela confirme des études antérieures où la flexion latérale pendant le lever était plus prononcée lorsque les Ma ne faisaient pas face au lieu de prise (Delisle *et al.*, 1996; Delisle *et al.*, 1999). Pendant le transfert, les moments sagittaux cumulés étaient plus élevés lors d'un {virage progressif}. Cette stratégie nécessitait plus de pas que le {virage ouvert} et donc, la durée du transfert était plus longue, augmentant ainsi le temps du cumul des moments.

La pose des pieds et les stratégies de déplacement sont des paramètres clés de la MM (Authier *et al.*, 1995; Authier *et al.*, 1996). Plusieurs principes augmentant les charges lombaires ont été associés à la pose et au déplacement des pieds. Ces facteurs comprennent le déséquilibre du corps, le désalignement postural, le fait de supporter la charge trop longtemps, la manière inappropriée de transiter entre le lever et le dépôt (Authier *et al.*, 1995; Authier *et al.*, 1996; Denis

et al., 2013). Par exemple, un {virage progressif} résulte d'une transition « pas à pas » entre la prise et le dépôt, tandis qu'un {tour ouvert} est une approche plus rapide et plus fluide. Une pose {Parallèle, ipsilatéral} augmente l'asymétrie de posture contrairement celle face à la charge {Pieds, faces}. La taille d'effet de la stratégie sur les moments varie de faible à élevée selon la pose de placement ou de déplacement. L'amplitude de la taille d'effet indique dans quelle mesure les stratégies de pieds reflètent les paramètres contribuant à l'augmentation des moments à L5/S1. Plusieurs principes de manutention sont dépendants des stratégies de pied et les résultats confirment l'importance d'une bonne stratégie des pieds pour respecter les principes de manipulation proposés par Denis *et al.* (2013).

L'effet d'expertise n'a été significatif que pour les moments dans le plan sagittal lors du lever. L'hypothèse de travail supposait que les moments seraient plus faibles chez les experts. Néanmoins, les résultats indiquent que les moments moyens entre les experts et les novices varient dépendamment de l'instant et du type de pose. Contrairement à Plamondon *et al.* (2010) et Plamondon *et al.* (2014) où le cumul des moments était légèrement plus faible chez les novices, il ne semble pas y avoir une tendance chez les experts par rapport aux novices. La seule pose pour laquelle les moments étaient significativement plus élevés chez les novices se trouvait être celle du {pied controlatéral avant} à l'instant de prise. Cette exception pourrait s'expliquer par une différence de posture entre les experts et les novices tel qu'indiqué dans Plamondon *et al.* (2010) et Plamondon *et al.* (2014).

4.5 Conclusion

Les modes opératoires peuvent varier dépendamment de l'expertise. Les experts ont tendance à opter pour une stratégie plus statique et progressive, alors que les novices sont plus fluides et variables. De plus, les novices tendent à être plus variables que les experts. Également, les types de stratégies de pieds ont des impacts variés sur les moments. Néanmoins, l'expertise ne semble généralement pas avoir d'effet sur les moments. Selon les résultats de ce chapitre, l'observation des stratégies de pieds permet d'identifier des comportements typiquement experts pour un contexte donné. Elle permettrait également d'identifier des postures ou des stratégies à risque pour l'articulation lombaire L5/S1.

5. UNE MÉTHODE D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE POUR LA CLASSIFICATION ET L'ANALYSE DES PLACEMENTS DES PIEDS : APPLICATION À LA MANUTENTION MANUELLE

5.1 Introduction

Les techniques d'apprentissage automatique se multiplient, notamment en biomécanique (Halilaj *et al.*, 2018). Cependant, aucune étude ne s'est intéressée au classement automatique des stratégies de placement des pieds par apprentissage automatique. L'objectif de ce chapitre vise le développement d'une méthode automatique de classement et d'analyse des déplacements des pieds par apprentissage automatique. Basée sur l'analyse du mouvement, la méthode est conçue pour apprendre une préclassification des pieds effectuée par un observateur (ou juge) et la reproduire ensuite pour déterminer le placement des pieds ultérieurs. La méthode est générique puisqu'elle peut être adaptée à tous les groupes, en fonction de l'application désirée. En outre, elle permet des observations détaillées telles que la variabilité des stratégies ou le placement moyen des pieds pour chaque groupe d'essais. Dans ce chapitre, nous allons décrire les concepts généraux et illustrer la manière dont la méthode peut être appliquée. Un exemple d'application consistera à présenter les résultats d'une analyse des placements de pieds de manutentionnaires pendant la phase de lever d'une tâche de palettisation.

5.2 Méthode

5.2.1 Exemple d'application

Les données expérimentales ont été recueillies lors d'une étude précédente (Plamondon *et al.*, 2010; Plamondon *et al.*, 2014) portant sur 30 sujets masculins (écart-type moyen, âge de 31 ± 10 ans, taille de 174 ± 6 cm, masse de 75 ± 11 kg)

Un système optoélectronique Optotrak (Northern Digital Inc., Waterloo, Ontario, Canada) a enregistré à une fréquence de 30 Hz les coordonnées 3D de marqueurs situés sur le participant. Comme l'étude portait sur le placement des pieds, seuls deux groupes de quatre marqueurs (un sur chaque talon) ont été utilisés. Les emplacements des repères anatomiques (malléole interne, malléole externe et extrémité du pied) ont été identifiés par rapport à leur groupe de marqueurs respectifs.

La tâche de manutention consistait à transférer 24 boîtes (quatre niveaux de six boîtes) d'une palette à l'autre (figure 5-1). Quatre répétitions de cette tâche ont permis de traiter 96 boîtes par sujet. Les sujets n'ont reçu aucune instruction ou commentaire sur la technique de manutention. Toutes les boîtes étaient de mêmes dimensions (26 cm x 35 cm x 32 cm) et avaient une masse de 15 kg (voir section 3.2.2 et section 4.2 des chapitres précédents pour plus de détails).

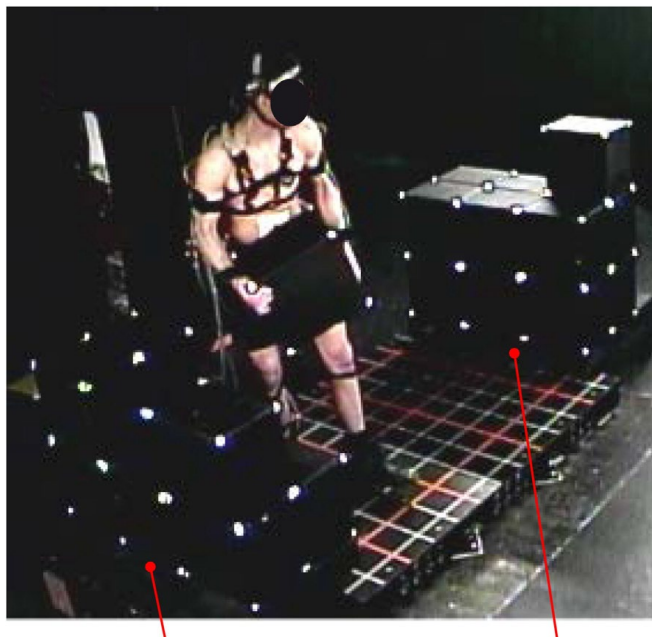


Figure 5-1. Plateau expérimental permettant de transférer 24 boîtes (quatre niveaux de six boîtes) d'une palette à l'autre.

Sur la base d'études antérieures (Authier *et al.*, 1995; Wagner *et al.*, 2009) et principalement sur l'étude du chapitre 3, le placement des pieds pendant la phase de lever ont été classés dans quatre groupes (figure 5-2, figure 5-3, figure 5-4). Le pied ipsilatéral et le pied controlatéral ont été définis en fonction du sens du virage. Les groupes étaient les suivants :

1. Pieds faces égaux (F) : les deux pieds étaient devant la palette de lever et pointaient vers celle-ci. Ils n'étaient pas, ou peu, orientés vers le lieu de dépôt;
2. Pied controlatéral en arrière (C) : le pied ipsilatéral était proche de la palette de lever et pointait vers celle-ci. Le pied controlatéral était en retrait et pouvait être légèrement tourné vers l'endroit du dépôt;
3. Pied ipsilatéral en arrière (I) : le pied controlatéral était proche de la palette de lever et pointait vers celle-ci. Le pied ipsilatéral était en retrait et pouvait être légèrement tourné vers l'emplacement du dépôt;
4. Parallèle (P) : les pieds n'étaient pas directement en face de la palette de lever. Ils pointaient tous les deux vers la zone de transition menant au lieu de dépôt

5.2.2 Caractéristiques des entrées

Les placements des pieds servent de données d'entrée à l'algorithme de classification. Un système de coordonnées global R_0 est associé à l'environnement et un système de coordonnées local est défini pour chaque pied (R_f , avec $f = \text{ipsi}$ ou contro pour le pied ipsilatéral ou controlatéral, respectivement).

La définition de R_0 dépend du contexte de l'étude. Par exemple, pour les tâches de manutention, elle pourrait être fixée sur la charge transportée, alors qu'en escrime, elle pourrait être fixée sur la piste de compétition. L'axe y_0 est déterminé pour R_f et R_0 à la même orientation lorsque le sujet se trouve dans une position de référence. L'axe z_0 est l'axe vertical. Son orientation dépend de la tâche effectuée et peut varier à l'intérieur de l'étude. Un manutentionnaire droitier et un autre gaucher, ayant la même stratégie de placement du pied, auront des systèmes de coordonnées locales symétriques. L'orientation de z_0 est utilisée pour comparer les configurations et x_0 permet de définir un cadre de référence orthogonal. La méthode proposée permet de classer le placement des pieds à un instant donné. Les caractéristiques d'entrée sont les positions et orientations de R_f en relation à R_0 .

Pour l'exemple en manutention manuelle, l'origine du R_0 était le centre du côté avant de la palette de lever (figure 5-2). L'axe y_0 pointait vers l'arrière de la palette, de sorte que R_f et R_0 avaient relativement la même orientation lorsque le sujet était devant la palette. L'orientation de l'axe z_0 a été adaptée de sorte que la rotation du sujet pendant son demi-tour corresponde à une rotation avec un angle positif le long de l'axe z_0 . Ainsi, indépendamment de l'emplacement de la palette de lever et du sens de rotation, chaque placement des pieds a été normalisé selon la configuration illustrée à la figure 5-2. Les systèmes de coordonnées locaux R_f étaient construits à partir des repères anatomiques. L'origine a été définie comme étant la projection au sol du point médian entre les malléoles internes et externes. L'axe y_f a été déterminé par une droite partant de l'origine du pied à son extrémité, projetée sur le plan du sol.

Entre le lever (l'instant où le manutentionnaire commence à soutenir complètement la boîte) et le dépôt (l'instant où la boîte commence à entrer en contact avec la palette de dépôt), les contacts des pieds ont été détectés à l'aide de la cinématique des pieds. La figure 5-2 montre l'emplacement des systèmes de coordonnées locaux pour chaque pas d'une tâche de manutention. Le terme « $y_{contra/ipsi;s}$ » correspond à l'axe y du pied controlatéral (ou ipsilatéral) du pas « s ». Le pas « 0 » est associé au lever et le dernier pas au dépôt. Le placement des pieds a été analysé à l'instant clé du lever (pas 0). Les éléments d'entrée pour la classification x_i étaient l'orientation du pied controlatéral θ_{contra} , l'orientation du pied ipsilatéral θ_{ipsi} et la position du pied controlatéral par rapport au pied ipsilatéral en coordonnées cartésiennes planaires ($x_{contra/ipsi}$, $y_{contra/ipsi}$) (Eq. 5.1).

$$x_i = \left[\theta_{contra} \quad \theta_{ipsi} \quad x_{contra/ipsi} \quad y_{contra/ipsi} \right] \quad \text{Eq (5.1)}$$

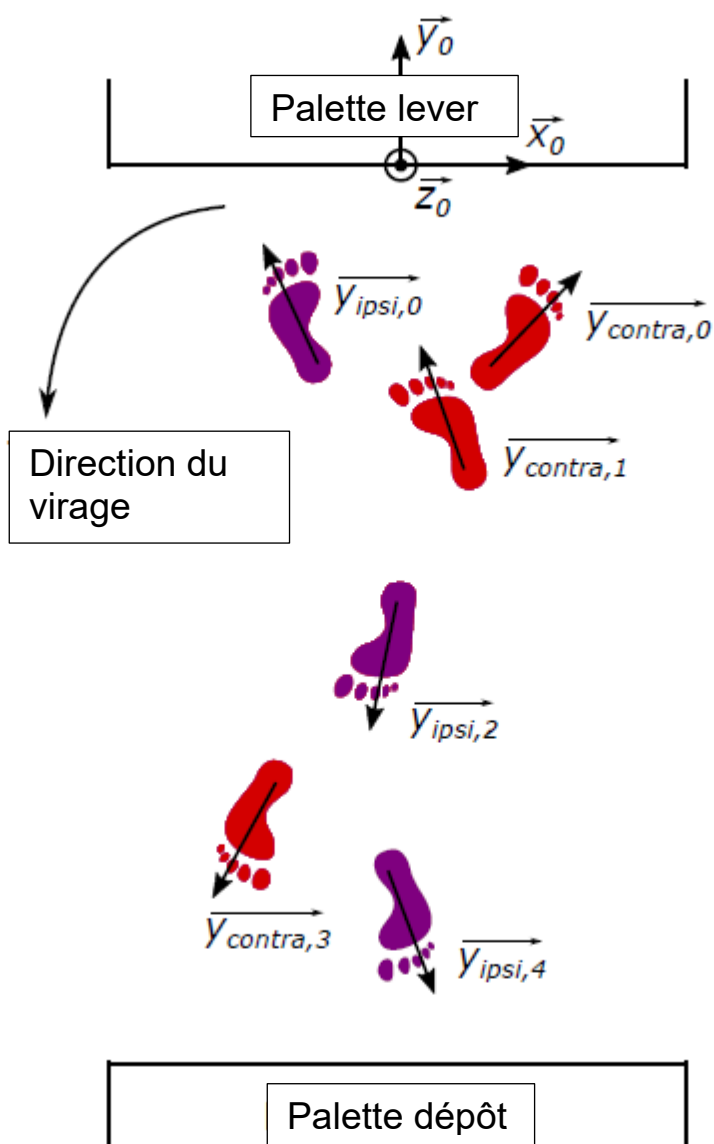


Figure 5-2. Exemple de placement des pieds d'une tâche de lever (entre la phase de lever et de dépôt).

5.2.3 Algorithme de classification

La classification a été réalisée à l'aide d'une méthode des k plus proches voisins « *k-nearest neighbors* » (kNN). Le principe de cette méthode est le suivant : partant d'un ensemble de données d'entraînement et d'une requête : la requête étant étiquetée selon l'étiquette des k voisins les plus proches dans l'ensemble de données d'entraînement. Les détails se retrouvent dans l'article de Muller, Vallée-Marcotte *et al.*, 2019).

5.2.4 L'analyse des données

L'apprentissage du modèle a été divisé aléatoirement en deux ensembles de données : un ensemble pour l'apprentissage (utilisé pour apprendre les paramètres du modèle et pour sélectionner l'hyperparamètre k) et un ensemble pour vérifier la méthode (utilisé pour évaluer la performance du modèle) (figure 5-3).

L'hyperparamètre k a été sélectionné en utilisant une validation croisée k fois (référéncée ici par k_{cv} pour le distinguer du k des k voisins les plus proches) sur l'ensemble des données d'apprentissage. Il correspondait à la valeur k avec la plus grande exactitude. La performance du modèle a été évaluée en termes d'exactitude, de sensibilité, de spécificité et d'aire sous la courbe (AUC) (Halilaj *et al.*, 2018). Le seuil de classification de la courbe (courbe caractéristique de fonctionnement du récepteur) est l'indice de confiance (Atiya, 2005)

La méthode proposée fournit des statistiques descriptives et une rétroaction visuelle sur les placements de pieds. Les placements moyens des pieds classés dans chaque groupe pourraient être considérés comme les valeurs moyennes des caractéristiques de chacun des éléments de ce groupe. La variabilité de chaque groupe pourrait être estimée comme l'écart-type de ces caractéristiques.

Dans l'exemple d'application, la méthode a été appliquée sur un seul des 30 participants. Les données de ce participant ont été exclues de celle de l'apprentissage et des tests. Le placement des pieds des 29 autres sujets a été classé par un seul observateur (A.M.) en fonction des groupes précédemment définis. Soixante-dix (70) % de ces données (provenant des 29 sujets) (1 949 tâches de manutention) constituaient l'ensemble d'apprentissage et les 30 % restants (835 tâches de manutention) formaient l'ensemble pour les tests (figure 5-3). Le réglage des hyperparamètres a été effectué avec $k_{cv} = 10$ en faisant varier k de 1 à 20. Enfin, pour évaluer l'exactitude de la classification des observateurs, une fidélité intrajuge a été réalisée sur 15 % des données sélectionnées au hasard. Le délai entre les deux observations était de quatre mois. Le pourcentage d'accord, le coefficient kappa (Cohen, 1960) et le PABAK (Byrt *et al.*, 1993) ont été calculés.

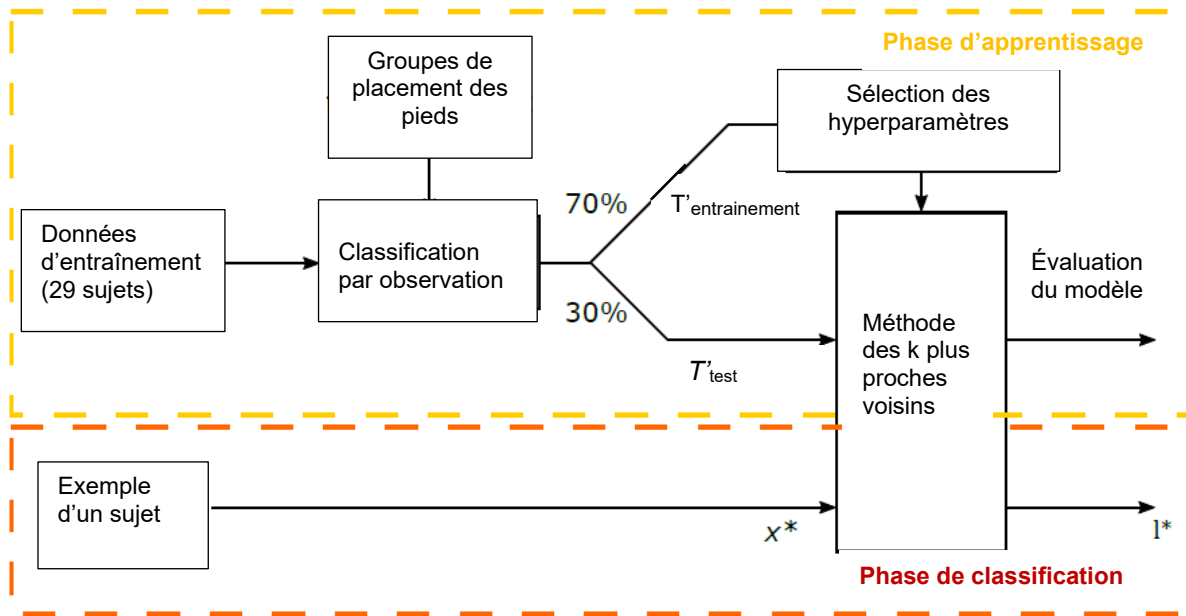


Figure 5-3. Représentation de l'architecture d'analyse.

Note : T'_{Training} et T'_{testing} sont les séries de données normalisées d'apprentissage et de tests, respectivement; x^* est la requête normalisée ; l^* est l'étiquette de x^* .

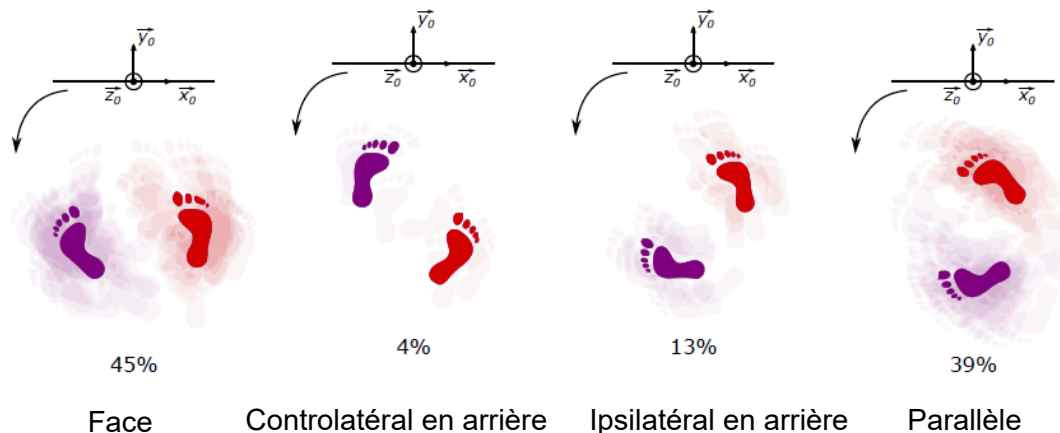


Figure 5-4. Visualisation de toutes les classes de placement des pieds.

Note : Pour chaque groupe, l'empreinte avec la couleur foncée représente le placement moyen du pied (centroïde de la classe). Les empreintes de pieds avec une plus grande transparence montrent tous les placements de pieds du groupe. Ces placements de pieds sont représentés deux fois : la position et l'orientation du pied ipsilatéral sont représentées en fonction du pied controlatéral moyen et la position et de l'orientation du pied controlatéral sont représentées en fonction du pied ipsilatéral moyen. Pour chaque image, l'emplacement des palettes et le sens du virage étaient les mêmes que ceux détaillés dans la figure 5-2.

5.3 Résultats

5.3.1 Fidélité intrajuge

Le pourcentage de concordance de l'analyse intrajuge était de 97 % et le coefficient Kappa et PABAK étaient de 0,95 et 0,94 respectivement. Il y a lieu de noter qu'un coefficient Kappa supérieur à 0,80 a été considéré comme une concordance presque parfaite (Landis et Koch, 1977).

5.3.2 Performance du modèle de classification

L'hyperparamètre ajusté k était de 8. Le tableau 5.1 montre la performance de la méthode de classification en termes d'exactitude globale, ainsi que l'exactitude, la sensibilité, la spécificité et la AUC pour chaque groupe.

Tableau 5.1. Évaluation de la méthode de classification du placement du pied en termes d'exactitude, de sensibilité, de spécificité et d'aire sous la courbe (AUC). L'évaluation était basée sur l'ensemble de données tests

%	Ensemble	F	C	I	P
Exactitude	96,9	98,5	99,0	98,1	98,1
Sensibilité		99,3	84,2	95,0	96,9
Spécificité		98,1	99,7	98,6	99,1
AUC		99,8	99,8	99,4	99,7
F : Face; C : Controlatéral en arrière; I : Ipsilatéral en arrière; P : Parallèle.					

5.3.3 Analyse

La figure 5-4 illustre les 96 placements des pieds du sujet sélectionné selon la classification étudiée, ainsi que la répartition pour ce sujet dans chaque groupe. Les caractéristiques des placements moyens des pieds dans chaque groupe sont détaillées dans le tableau 5.2.

Pour le groupe **Face** (*pieds faces égaux*), les pieds étaient dirigés vers la palette. La rotation du pied ipsilatéral était légèrement plus grande, car le sujet était légèrement tourné vers le lieu de dépôt. Pour groupes **Controlatéral** et **Ipsilatéral**, l'un des pieds était derrière ($y_{c/i} = 28$ cm et $y_{c/i} = 33$ cm). Le pied avant était dirigé vers la palette de lever. Pour le groupe **Parallèle**, les pieds pointaient vers la zone de transition menant au lieu de dépôt. La rotation du pied ipsilatéral était plus importante que 90 ° alors que le pied controlatéral était dans une position intermédiaire.

La figure 5-5 et la figure 5-6 illustrent les classifications des placements des pieds lorsque les caisses se trouvaient respectivement en haut de la pile (caisses hautes) et près du sol (caisses basses). Pour le sujet sélectionné ($n = 1$), la fréquence des patrons de placement des pieds variait en fonction de la hauteur de caisse. Ainsi, 83 % ont été classés dans le groupe F dans le cas des caisses basses et 42 % lorsque celles-ci étaient hautes. À l'autre extrême, seuls 4 % ont été classés dans P pour les caisses basses contre 42 % pour celles hautes. Dans le même groupe, le placement et l'orientation des pieds étaient influencés par la hauteur de lever. Par exemple, dans le groupe Face, le pied controlatéral était moins tourné vers le lieu de dépôt (6 contre 310) et la distance entre les pieds était plus grande (46 contre 30 cm) pour les caisses inférieures.

La distance entre les pieds a également augmenté pour les boîtes inférieures dans les autres groupes (46 contre 35 cm en moyenne).

Tableau 5.2. Moyenne (écart-type) des caractéristiques des placements de pieds du sujet sélectionné dans chaque groupe. Ces données étaient exclues de celles d'apprentissage et de test

%	F	C	I	P
Θ_c [°]	9 (23)	-29 (29)	27 (11)	56 (13)
Θ_i [°]	31(17)	-21 (22)	73 (16)	105 (23)
$x_{c/i}$ [cm]	39 (8)	30 (6)	24 (8)	6 (9)
$y_{c/i}$ [cm]	6 (8)	-28 (8)	33 (8)	37 (8)
F : Face; C : Controlatéral en arrière; I : Ipsilatéral en arrière; P : Parallèle.				

5.4 Discussion

Ce chapitre propose une méthode de classification des placements des pieds basée sur un algorithme d'apprentissage automatique. Cette méthode pourrait être adaptée à toute classification prédéfinie et donc aux applications dans le domaine du sport, de la rééducation ou de l'ergonomie. Au lieu d'imposer un type de placement des pieds (Kirby *et al.*, 1987; Delisle *et al.*, 1996; Delisle *et al.*, 1999; Zhou *et al.*, 2016), une méthode de classification a posteriori est utilisée pour analyser les stratégies choisies par les participants et ainsi observer l'influence de la tâche sur le placement des pieds. Comparativement à une méthode basée sur l'observation (Bhatt *et al.*, 2013; Adamson *et al.*, 2019), le traitement des données en termes de durée est beaucoup plus court. Dans l'exemple d'application, le temps de traitement était d'environ 10 ms par classification³ alors qu'une observation précise et une prise de décision prennent nécessairement plusieurs secondes. Dans le cas de l'analyse d'une base de données complète, le temps nécessaire au traitement des données devient un critère majeur. Aussi, une fois la phase d'apprentissage terminée, la classification est automatique et ne dépend pas des personnes qui traitent les données. De plus, l'apprentissage peut être réutilisé dans d'autres études. Grâce à un algorithme d'apprentissage automatique, toutes les données disponibles sur la localisation des pieds peuvent être prises en compte simultanément. Les méthodes de classification précédemment rapportées dans la littérature (Authier *et al.*, 1995; Wagner *et al.*, 2009; Wagner *et al.*, 2010) exigeaient des critères basés sur une variable telles que la position ou l'orientation du pied. Dans la méthode proposée, l'apprentissage est basé sur un observateur humain classant un ensemble d'exemples. Cela permet de prendre en compte des critères qui peuvent être difficiles à interpréter en termes d'équations.

³ Ce temps peut varier en fonction du type d'ordinateur utilisé.

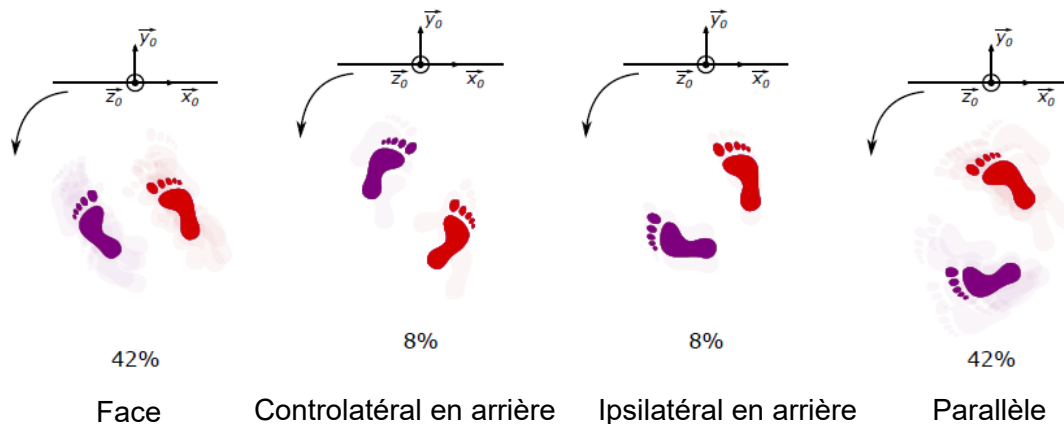


Figure 5-5. Classement du placement des pieds lorsque les caisses se trouvent sur la rangée supérieure. La représentation est la même que celle de la figure 5-4.

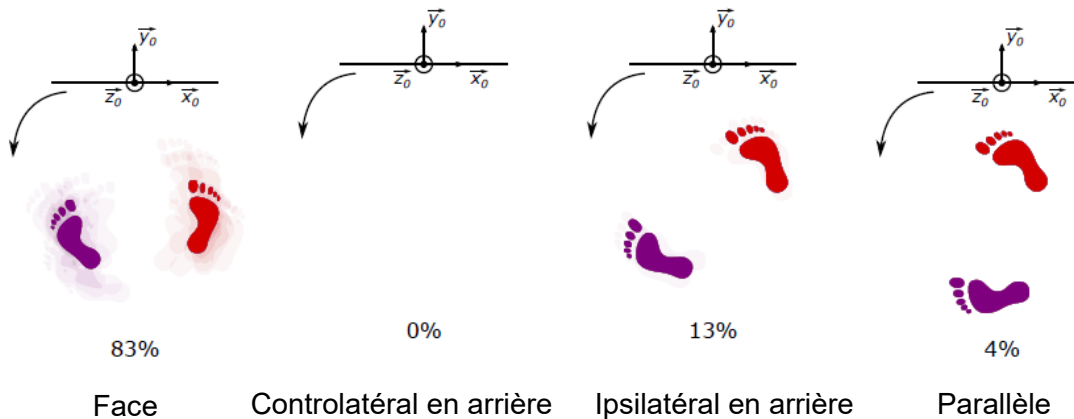


Figure 5-6. Classement du placement des pieds lorsque les caisses sont proches du sol. La représentation est la même que celle de la figure 5-4.

L'évaluation de la performance du modèle peut être interprétée différemment selon le type d'application (Halilaj *et al.*, 2018). Dans un contexte ergonomique, l'exactitude de notre méthode est supérieure (au-dessus de 90 %) à celle de la fidélité intrajuge rapportée dans la littérature (Denis *et al.*, 2000; Denis *et al.*, 2002; Palm *et al.*, 2016; Eliasson, Palm, Nyman et Forsman, 2017). Ces résultats apparaissent valider la méthode proposée. En plus de la fidélité intrajuge, ces derniers valident indirectement la performance d'apprentissage de l'observateur. Si la classification de l'observateur avait été mauvaise, alors l'algorithme de classification n'aurait pas fait mieux et aurait nécessairement donné des résultats médiocres. Certains placements de pieds semblent être sur la zone limitrophe de plusieurs groupes. Dans le cas du participant sélectionné, les placements et orientations des pieds du groupe Ipsilatéral et du groupe Parallèle étaient assez proches (figure 5-4), ce qui aurait rendu difficile la classification selon des critères fixes basés sur des seuils établis. Les résultats des tests de performance indiquent que notre modèle parvient à une bonne différenciation entre les groupes en combinant les données de toutes les caractéristiques.

L'exemple d'application en manutention démontre l'utilité d'une telle approche. Les données pour le participant sélectionné démontrent qu'il existe deux patrons favoris : Face et Parallèle. Dans le premier modèle, il a tendance à adopter une posture symétrique pendant de lever de caisse. Le second modèle implique une certaine asymétrie de posture lors du lever, pour assurer une transition en douceur vers le lieu de dépôt et donc afin de minimiser le temps de chargement. Pour les modèles appartenant aux autres groupes, l'orientation du pied arrière était différente. En effet, lorsque le pied ipsilatéral était en arrière, le corps tournait dans la direction du lieu de dépôt, ce qui permettait au sujet d'initier une trajectoire directe vers le lieu de destination. En outre, comme précédemment rapporté dans la littérature (Authier *et al.*, 1995), le participant a adapté sa stratégie de placement des pieds en fonction de la hauteur de la caisse. Ainsi, comme les caisses basses présentent un risque de blessure plus important (Plamondon *et al.*, 2010), une majorité des manutentionnaires semble avoir adopté une posture qui favorise la symétrie du corps (pieds face à la charge). Aussi, pour le même type de placement de pieds, la distance entre les pieds du sujet a augmenté, probablement pour : améliorer la stabilité du corps avec une plus grande base de soutien (Delisle, Gagnon et Desjardins, 1998); pour réduire le chargement asymétrique; pour se rapprocher davantage de la charge (Kingma *et al.*, 2004)

La méthode de classification était axée sur le placement des pieds à un instant clé donné (au lever, sans appui). Les autres phases de la tâche peuvent être aussi analysées, comme celles qui surviennent au premier contact avec les mains, au dépôt ou après le dépôt. En outre, la méthode proposée pourrait être étendue pour tenir compte d'une succession de pas. Par exemple, l'étape qui suit celle du lever pourrait être ajoutée aux analyses (figure 5-2). En considérant les données du participant sélectionné, la figure 5-7 illustre la moyenne des placements des pieds des premiers pas lorsqu'au lever le placement des pieds était dans le groupe Face. Deux classes ont été utilisées ici, dépendant du type de premier pas. Différents types de sous-classes pourraient être ajoutées pour différencier, par exemple, un pas de réorientation du pied d'un pas de progression (Wagner *et al.*, 2009). De plus, dans l'exemple d'application, le pied a été estimé comme étant sa projection sur le sol. Des sous-groupes pourraient être définis pour distinguer quand un pied est sur le sol et quand il ne l'est pas.

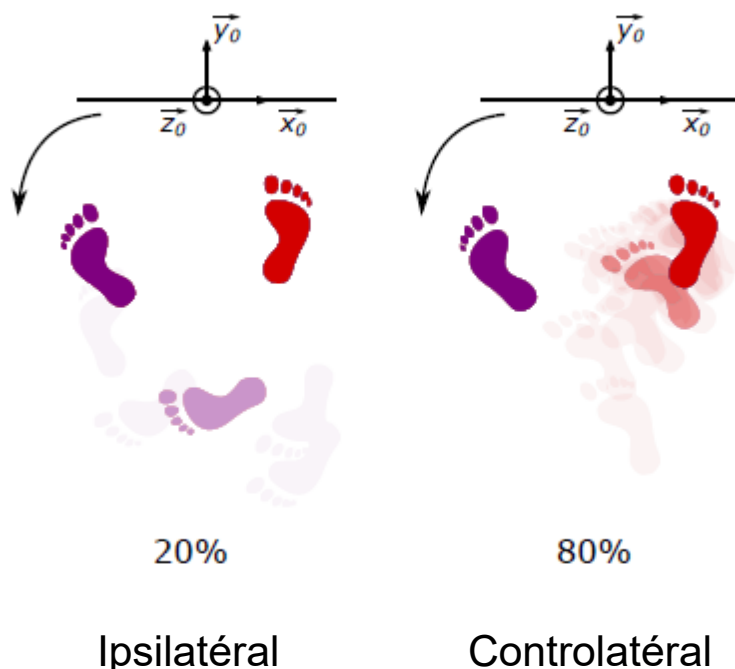


Figure 5-7. Placement du pied lors du premier pas lorsqu'au lever le placement des pieds était dans le groupe Face.

Note : L'empreinte de pied sombre représente le placement moyen du pied pendant le lever. L'empreinte en transparence intermédiaire représente le pas moyen effectué après le lever (que le pas soit effectué par le pied controlatéral, auquel cas le placement moyen est représenté en rouge, ou qu'il soit effectué par le pied ipsilatéral, pour lequel le placement moyen est représenté en violet). Tous les premiers pas sont également illustrés, mais avec la plus grande transparence. L'emplacement des palettes et le sens de rotation sont indiqués sur la figure 5-2.

L'exemple d'application a été réalisé sur des tâches de manutention, mais la méthode de classification par apprentissage automatique peut également être appliquée à d'autres contextes tels que le sport ou la réhabilitation. Par exemple, dans les sports, la classification des techniques de placement des pieds lors du squat ou du « *Leg Press* » (Escamilla *et al.*, 2001) peut être effectuée au moyen d'une technique d'apprentissage automatique. Puisque dans ce cas, la variabilité des techniques possibles est relativement faible, la quantité de données nécessaires pour l'apprentissage et les tests de validation peut être réduite. Dans le domaine de la réhabilitation, les techniques d'apprentissage automatique peuvent être utilisées pour classer les stratégies de virage (Bhatt *et al.*, 2013; Adamson *et al.*, 2019). Dans ce cas, l'analyse nécessite plusieurs étapes successives augmentant la variabilité au sein de chaque groupe. Ainsi, le nombre de données relatives à l'apprentissage et aux tests augmente considérablement.

Une limite de cette méthode concerne les caractéristiques anatomiques du sujet (taille ou orientation neutre), qui ne sont pas prises en considération. Cependant, comme il a été observé dans l'exemple d'application, des variations dans le placement des pieds ont été observées pour le même sujet, en fonction de la tâche. En outre, la quantité de données utilisées pour la phase

d'apprentissage est un critère important pour assurer une classification précise (Halilaj *et al.*, 2018) : il faut donc disposer de suffisamment de données pour assurer un apprentissage complet, mais pas au point d'entraîner un surajustement. La quantité nécessaire dépend principalement de la variabilité des données entre les groupes. En biomécanique pour assurer un apprentissage complet, le facteur limitant n'est généralement pas les données d'entrée facilement collectées par capture de mouvement, mais plutôt le nombre de participants.

5.5 Conclusion

La méthode proposée classe et analyse automatiquement les placements de pieds sur la base d'une préclassification effectuée par un observateur. Il peut être adapté à des applications sportives, de réadaptation et d'ergonomie. Un exemple d'application utilisant une tâche de manutention manuelle a démontré l'utilité de classer les placements de pieds en groupes afin de caractériser les stratégies et la variabilité moyennes des pas dans un contexte donné.

6. COMPARAISON DE DEUX MÉTHODES DE CLASSIFICATION DES PLACEMENTS DE PIEDS : CLASSIFICATION AUTOMATIQUE VS PAR OBSERVATION

6.1 Introduction

Dans le chapitre 3, une méthode de classification par observation des placements et des déplacements des pieds a été présentée puis (au chapitre 4) appliquée sur une banque de données portant sur des experts et novices effectuant une tâche de manutention. Au chapitre 5, une méthode de classification automatique par apprentissage automatique a été développée et validée sur les mêmes types de données. Toutefois, une comparaison directe entre les deux méthodes n'a pas été réalisée. L'objectif de ce chapitre était d'effectuer une comparaison entre la méthode de classification des placements des pieds automatique (quantitatif) versus celle par observation des sujets (qualitatif).

6.2 Méthode

6.2.1 Données expérimentales

La comparaison a été réalisée à partir d'une banque de données de 30 sujets hommes (15 experts et 15 novices; Plamondon *et al.*, 2010; Plamondon *et al.*, 2014) qui effectuaient une tâche de manutention dans lequel ils devaient transférer des caisses d'une palette à une autre palette (voir section 3.2.2 et section 4.2 des chapitres précédents). Les observations ont été réalisées sur tous les trajets « aller » des 5 transferts complets (2 à cadence libre et 3 à cadence imposée). Uniquement les 6 caisses positionnées à l'étage supérieur (caisses hautes) et les 6 caisses positionnées au sol (caisses basses) sur la palette de prise ont été observées. La méthode de classification automatique a été appliquée sur l'ensemble des essais où les données de capture de mouvement étaient disponibles, c'est-à-dire le dernier transfert aller-retour des 24 boîtes à cadence libre et le dernier transfert aller-retour des 24 boîtes à cadence imposée. Ainsi, les données permettant la comparaison entre la méthode de classification par observations et la méthode de classification automatique sont, pour chacun des 30 sujets, les 6 caisses hautes et 6 caisses basses du dernier aller à cadence libre, et les 6 boîtes hautes et 6 boîtes basses du dernier aller à cadence imposée. Pour l'ensemble des sujets, cela revient donc à analyser 720 transferts de boîtes.

6.2.2 Classification des placements des pieds

Les observations des placements des pieds des manutentionnaires sont les mêmes que celles utilisées dans le cadre du chapitre 3. Les placements de pieds ont été classés suivant 3 groupes : pieds faces égaux à la palette {F}, un pied devant l'autre {CI} et pieds parallèles à la palette {P}. La classification a été réalisée à 2 instants différents : à la prise (instant où le sujet commence à supporter totalement la boîte) et au dépôt (instant du premier contact entre la boîte et le support de dépôt).

6.2.3 Analyse des données

La comparaison entre la méthode de classification automatique et la classification par observations a été évaluée à l'aide de l'exactitude (proportion de classifications correctes), la sensibilité (capacité de détection), la spécificité (capacité de discrimination) et la surface sous la courbe (AUC pour *Area Under the Curve*; Halilaj *et al.*, 2018) (capacité de distinction des classes). Le seuil de classification de la courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*; Atiya, 2005) a été choisi comme l'indice de confiance. La classification par méthode d'observation a été considérée comme la classification de référence.

6.3 Résultats

L'exactitude globale était de 85 % (tableau 6.1) et de 77 % (tableau 6.2) respectivement pour la classification des placements de pieds à la prise et au dépôt.

Concernant l'instant de prise, l'exactitude est similaire, quel que soit le placement de pied étudié. Pour chacune des classes, la sensibilité est plus faible que la spécificité avec une valeur de sensibilité minimale de 72 % pour {CI} (tableau 6.1). Cela signifie, en particulier pour ce groupe, que la méthode de classification a plus de capacité de discrimination (c'est-à-dire à identifier qu'un placement de pied n'appartient pas à un groupe) que de capacité de détection (c'est-à-dire à identifier qu'un placement de pied appartient à un groupe). De manière globale, comme indiquent les valeurs d'AUC supérieures à 89 %, la méthode automatique démontre une capacité de distinction des classes (tableau 6.1).

Concernant l'instant de dépôt, l'exactitude est variable suivant la classe considérée. La classe avec la meilleure exactitude est {P} (tableau 6.2). De la même manière que lors de la prise, la sensibilité pour {F} est bien inférieure à sa spécificité. Globalement, en accord avec les résultats de l'exactitude, la distinction des classes est supérieure pour {P} par rapport aux deux autres groupes.

Tableau 6.1. Évaluation de la méthode de classification automatique des placements de pieds à la prise en termes d'exactitude, sensibilité, spécificité et surface sous la courbe (AUC)

[%]	Global	{F}	{CI}	{P}
Exactitude	85	91	89	90
Sensibilité	-	87	72	86
Spécificité	-	95	91	93
AUC	-	95	89	94

Tableau 6.2. Évaluation de la méthode de classification automatique des placements de pieds au dépôt en termes de justesse, sensibilité, spécificité et surface sous la courbe (AUC)

[%]	Global	{F}	{CI}	{P}
Exactitude	77	83	78	94
Sensibilité	-	72	80	91
Spécificité	-	94	76	94
AUC	-	82	78	91

6.4 Discussion/conclusion

Concernant l'instant de prise, l'exactitude observée est satisfaisante, notamment en comparaison aux résultats de fidélité intrajuge rapportés dans la littérature pour des observations ergonomiques. Les valeurs de distinction observée entre les classes viennent confirmer cette tendance. Seul {CI} semble faire apparaître une distinction entre les classes et surtout une sensibilité plus faible. Cela met en évidence le fait que la distinction entre {CI} et les deux autres groupes peut parfois être faible. En effet, lorsque les deux pieds sont face à la palette avec un pied légèrement devant, la distinction entre {F} et {CI} est dépendant de la distance entre les pieds et peut varier selon la perception (analyse vidéo ou calcul d'une distance à partir d'une analyse de mouvement). De même, lorsqu'un pied est en arrière et parallèle à la palette, seule l'orientation du pied devant permet de distinguer {CI} et {P}. Une analyse vidéo en ayant un visuel du corps complet peut alors influencer le choix de classification qui est réalisée uniquement à partir de la position des pieds dans le cas de la classification automatique. De plus, l'observateur ayant réalisé la classification par observations n'est pas le même que celui de la classification automatique. Cela a nécessairement induit une différence dans les choix de classification parfois subjectifs.

Concernant l'instant de dépôt, en plus des observations déjà réalisées précédemment, une exactitude plus faible semble être obtenue pour {F} et {CI}. Dans la grande majorité des cas, cela vient du fait que le sujet se déplace vers le lieu de dépôt et commence à initier le contact entre la caisse et le support pendant la phase de marche, juste avant de se placer face à la palette. Dans ce cas, le sujet finissant le dépôt en étant face à la palette, la classification faite par observations privilégie le {F}. Si l'instant de contact entre la boîte et le support est différent et identifié lors de la marche, alors la classification automatique privilégie {CI}. Ce phénomène est confirmé par la plus faible sensibilité observée pour {F}.

Finalement, la comparaison entre les deux méthodes de classification semble satisfaisante. Deux éléments apportent cependant quelques différences. D'une part, certains placements de pied sont dans la zone limitrophe des deux classes. L'utilisation d'une vidéo permettant de visualiser l'ensemble du corps face à une analyse de mouvement des pieds et à l'utilisation de deux observateurs différents créé alors des différences de jugement pour la classification de ces cas spécifiques. D'autre part, l'instant considéré pour l'analyse du placement de pied peut être différent. Dans le cas d'une observation vidéo, l'observateur a tendance à considérer les intentions du sujet alors qu'une analyse de mouvement utilise un instant fixe défini par un critère objectif.

Ces résultats de comparaison sont en concordance avec les résultats de la performance de la méthode de classification (chapitre 5). La méthode automatique permet d'obtenir des résultats très satisfaisants et des écarts apparaissent seulement lorsque la classification est réalisée par plusieurs observateurs ou lorsque l'instant à observer n'est pas le même.

7. TESTS EN LABORATOIRE : APPLICATION DE LA MÉTHODE DE DÉTECTION DES PAS LORS D'ACTIVITÉS DE MANUTENTION MANUELLE

7.1 Introduction

L'objectif de cette section expérimentale était d'appliquer notre nouvelle méthode de détection automatique des pas sur des participants novices lors d'activités de manutention en variant le poids de la caisse, la hauteur de la caisse, la distance de transfert et la cadence. Les hypothèses étaient les suivantes :

1. Les conditions avec restrictions des pieds (en limitant la distance de transfert) seront caractérisées par une forte asymétrie de posture au niveau du dos;
2. La cadence imposée (rapide) aura pour effet d'amplifier l'impact des conditions avec restrictions;
3. La stratégie de placements des pieds aura une influence en augmentant ou en diminuant les chargements au dos.

7.2 Méthodes

7.2.1 Participants

Dix-sept participants (2 femmes, 15 hommes; moyenne \pm SD : masse corporelle de 82 ± 15 kg, taille de 175 ± 8 cm, âge de 36 ± 10 ans) ont rempli un formulaire de consentement éclairé avant de participer à l'étude approuvé par le comité d'éthique de l'Université de Laval. Les critères d'inclusion étaient : une aptitude physique jugée adéquate sur la base du questionnaire sur l'aptitude à l'activité physique (Q-AAP); l'absence de trouble musculosquelettique affectant le travail ou présent dans les sept derniers jours selon le questionnaire nordique (Forcier *et al.*, 2001); et une expérience professionnelle dans la MM variant entre 0,5 et 5 ans (moyenne \pm ET : $2,2 \pm 1,3$ ans). Les critères d'exclusion étaient un IMC supérieur à 30, un âge supérieur à 60 ans et inférieur à 18 ans.

7.2.2 Instrumentations

La cinématique du corps entier a été enregistrée à une fréquence de 30 Hz avec un système Optotrak Certus à huit caméras (Northern Digital Inc., Waterloo, Canada). Les marqueurs DEL ont été regroupés par trois pour former des plaques (clusters) de marqueurs rigides. Les plaques étaient attachées par des sangles aux mains, avant-bras, bras, têtes, cuisses, jambes et pieds (figure 7-1). Des blocs munis de marqueurs rigides ont également été fixés sur la peau avec de l'adhésif médical sur le dessus de l'acromion, au niveau T6-T7 et au niveau S1-S2 pour capter les omoplates, le tronc et le bassin (figure 7-1). Les plaques ont été placées sur les surfaces osseuses des segments du corps pour réduire l'artefact des tissus mous. Les marqueurs étaient reliés à un stroboscope placé sur une ceinture qui transmettait les données à un récepteur sans fil. La cinétique a été enregistrée à une fréquence de 1 000 Hz à partir d'une plateforme de force de fabrication maison (taille 190 x 130 x 18 cm) composée de six capteurs de force AMTI (modèle MC3A-6-1000; Advanced Mechanical Technology Inc., Watertown, MA, USA). Trois caméras

vidéo numériques ont enregistré les essais à partir de différentes vues. Enfin, la synchronisation était assurée par le système Optotrak qui envoyait un signal de démarrage aux autres systèmes.

7.2.3 Protocole expérimental

Quarante-huit repères anatomiques respectant les recommandations de la Société internationale de biomécanique (Wu *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2005) ont été identifiés à l'aide d'un pointeur numérique du système Optotrak dans une posture debout statique neutre. La tâche de MM consistait à soulever une caisse d'une palette, à la transporter puis à la déposer sur une autre palette du côté opposé de la plateforme. Le participant commençait toujours l'essai dans une position où il faisait dos à la caisse à transférer, c'est-à-dire face à la palette de dépôt. Lorsque le signal de départ était donné, il se retournait, prenait la caisse, la transportait et la déposait sur l'autre palette. Ensuite il revenait pour faire face à la palette où se trouvait la caisse à l'origine. Cette séquence était considérée comme « une répétition », et quatre répétitions ont été effectuées pour chacune des 48 conditions expérimentales, pour un total de 192 caisses manipulées. Quelques essais de pratique avec une boîte de 2 kg ont été réalisés pour familiariser le sujet avec la tâche jusqu'à ce qu'il se sente à l'aise (environ trois minutes).

Quatre conditions externes (hauteur, distance, masse et cadence) ont été contrôlées pendant l'expérience. Ces conditions étaient :

- deux hauteurs de lever et de dépôt de 16 cm et 116 cm; donc quatre conditions de hauteur lors du lever et du dépôt (bas-bas, bas-haut, haut-bas et haut-haut);
- trois distances de transfert entre les palettes : 0,5 m, 1,0 m et 1,5 m;
- deux masses de caisses : 10 kg et 20 kg;
- deux cadences : une vitesse d'exécution libre choisie par les sujets et une vitesse normalisée plus rapide. Tout d'abord, les tâches ont été exécutées à un rythme libre et le temps a été enregistré sans en informer le sujet. Ensuite, un temps 25 % plus rapide était imposé avec des signaux sonores indiquant le début et la fin de chaque répétition.

Les essais commençaient toujours par la distance de transfert la plus longue entre les palettes et progressaient vers la distance la plus courte. L'ordre des autres conditions a été randomisé entre les sujets. Des pauses d'environ une minute étaient prévues lorsque les chargés de projet devaient modifier la configuration en fonction de l'essai suivant. Pour limiter la fatigue, les participants ont évalué leur niveau d'effort perçu à l'aide de l'échelle de Borg-20 (Borg, 1982). Lorsque l'évaluation de l'effort perçu dépassait le seuil de 11/20, une pause de deux minutes était accordée. Si ce seuil était dépassé lors de l'essai suivant, une pause de trois minutes était alors accordée, sinon la pause habituelle d'une minute était allouée. Les sujets n'ont jamais été informés de cette procédure pour éviter d'influencer l'effort perçu.

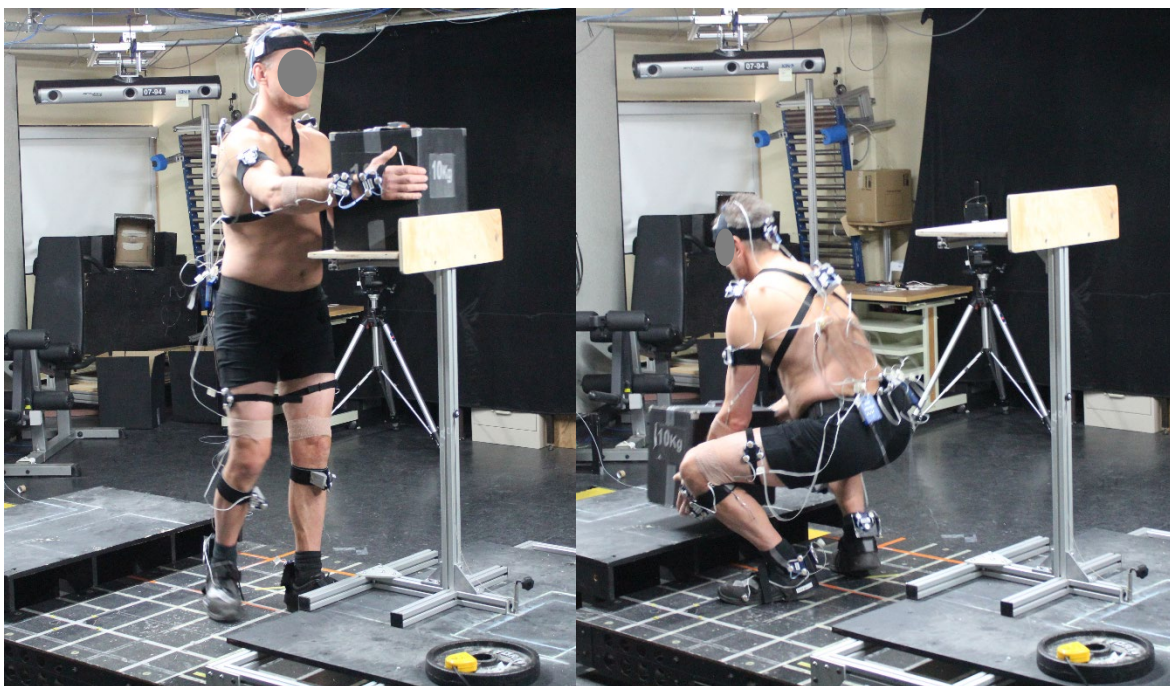


Figure 7-1. Illustration d'un participant dans l'une des tâches de manutention.

7.2.4 Traitement des données

Un modèle biomécanique segmentaire, composé de 16 segments rigides reliés par 15 articulations représentant un total de 37 degrés de liberté, a été conçu avec CusToM, une boîte à outils personnalisée développée dans un environnement Matlab pour permettre une analyse du mouvement musculosquelettique (Muller, Pontonnier *et al.*, 2019). Les paramètres géométriques des segments du corps ont été personnalisés en fonction du sujet en utilisant les données de capture de mouvement et une méthode basée sur l'optimisation (Puchaud *et al.*, 2020). Les paramètres inertiels des segments corporels ont été estimés au moyen de tables anthropométriques (Dumas, Cheze et Verriest, 2007). À partir des positions des 48 repères anatomiques obtenues des positions des plaques de marqueurs rigides sur chacun des segments, les coordonnées des centres articulaires ont été calculées par une approche de cinématique inverse avec optimisation multicorps (Lu et O'Connor, 1999) puis filtrées avec un filtre passe-bas de Butterworth d'ordre 4 avec une fréquence de coupure de 6 Hz et sans déphasage.

À partir des trois vues des caméras vidéo numériques, un observateur a identifié les instants de lever et de dépôt des caisses. Le lever a été défini comme l'instant où la boîte a perdu le contact avec la palette et le dépôt comme l'instant où la boîte est entrée en contact avec la palette. La phase de transfert est celle qui se situe entre les phases de lever et de dépôt. Pour chaque caisse manutentionnée, le chargement au dos a été estimé entre les moments du lever et du dépôt.

Pour ce qui concerne la quantification des pas, la méthode automatique du placement des pieds a été utilisée (voir chapitre 5). Les placements des pieds ont été classés suivant 3 groupes : pieds faces à la palette (Gr. 1), un pied devant l'autre (Gr. 2) et pieds parallèles à la palette (Gr. 3). La

classification a été réalisée seulement à l'instant du lever de la caisse (instant où le sujet commence à supporter totalement la boîte).

7.2.5 Analyses statistiques

Dans un premier temps, il était nécessaire de savoir si les variables indépendantes (poids, hauteur, distance et cadence) avaient eu des impacts sur des variables dépendantes considérées comme majeures dans le chargement lombaire. Plusieurs variables dépendantes ont donc été examinées lors de la phase de lever dans les analyses statistiques : 1) les valeurs maximales du moment résultant à l'articulation L5/S1 ont été calculées à partir de la somme vectorielle des trois composantes du moment externe (extension, flexion latérale et torsion); 2) les valeurs maximales du moment asymétrique à L5/S1 calculées à partir de la somme vectorielle des composantes de flexion latérale et de torsion. Aussi, à l'instant du moment résultant maximal ont été extraits : les angles de torsion du segment lombaire 3D entre L5/S1 et T6, l'inclinaison du tronc par rapport à la verticale et la flexion moyenne du genou droit et gauche. Finalement, la durée du transfert (ou le temps d'envol) a été estimé entre l'instant du lever et celui du dépôt.

Le temps de traitement des données étant très long, l'analyse de tous les essais aurait pris un temps considérable. Par conséquent, seule la troisième répétition de chaque essai a été conservée pour les analyses statistiques, sauf en cas de problème de qualité des données. Si un problème se présentait, la deuxième, la quatrième ou la première répétition était sélectionnée dans cet ordre respectif. Nous avons choisi la 3^e répétition en supposant que celle-ci avait permis au participant de s'ajuster à la condition expérimentale. Des tests paramétriques ont été utilisés pour vérifier la normalité de la distribution à l'aide des tests de Lilliefors. Des analyses séparées de variance à mesures répétées à quatre facteurs ont été effectuées sur les variables dépendantes avec comme facteurs (tableau 7.1) : la hauteur des tablettes (bas-bas, bas-haut, haut-bas et haut-haut); la distance (1,5 m, 1,0 m et 0,5 m); la masse des caisses (10 kg et 20 kg); et la cadence (libre et rapide). Des post-hoc Bonferroni ont été effectués lorsque l'effet de la hauteur ou de la distance était significatif. Lorsque la condition de sphéricité n'était pas respectée selon le test de Mauchly, la correction de Huynh-Feldt a été appliquée. Le niveau de signification était de $P < 0,05$.

Les différences de distribution des groupes de placement des pieds pour chaque condition ont été analysées par un test du chi carré (tableau 7.2). Enfin, des statistiques descriptives (tableau 7.3) ont été utilisées pour présenter les résultats des moments résultants et asymétriques à L5/S1 en fonction de la position des pieds pour les quatre variables indépendantes (hauteur, distance, charge, cadence).

7.3 Résultats

Le tableau 7.1 présente les résultats statistiques des moments résultants et asymétriques ainsi certaines variables cinématiques à l'instant du moment résultant. Comme il fallait s'y attendre, les effets de masse, de hauteur et de cadence ont tous influencé de manière significative les moments maximaux résultant et asymétrique, seule la distance entre les palettes n'a pas eu d'impact. La hauteur des tablettes a eu des effets significatifs sur toutes les variables cinématiques à l'instant du moment maximal (torsion lombaire, inclinaison du tronc, flexion des genoux, durée). La masse de la charge a surtout influencé l'angle des genoux et la durée (10 kg < 20 kg) L'influence de la distance s'est appliquée sur la durée de transfert et la flexion

des genoux ($0,5\text{ m} < 1,5\text{ m}$) et également sur l'inclinaison du tronc ($0,5\text{ m} > 1,5\text{ m}$). Enfin la cadence élevée par rapport à celle normale a fait en sorte de réduire la durée de transfert ainsi que la flexion des genoux, mais d'augmenter la torsion.

Le placement des pieds lors du lever de charge est déterminé par plusieurs facteurs qui sont identifiés au tableau 7.2. En premier, les participants ont choisi de placer leurs pieds dans 66 % des essais en face de la charge à soulever {pieds faces}, puis dans 26 % les {pieds parallèles}, et dans seulement 8 % des essais un {pied en avant}. La hauteur des tablettes, la distance des palettes et la cadence de travail ont significativement influencé la façon dont le participant a choisi de placer ses pieds. Par exemple, dans le cas d'une caisse au sol, les participants ont choisi de favoriser le placement des {pieds faces} dans 78 % des essais, tandis que sur une tablette élevée, ce même placement n'a été choisi que dans 48 % afin de favoriser une approche plutôt de type {pieds parallèles}. On observe le même type de comportement du manutentionnaire lorsque la distance des palettes ainsi que la cadence augmentent, passant d'un placement en majorité {pieds faces} vers celui favorisant les deux types de placements {pieds faces} et {pieds parallèles}. Enfin, la masse n'a pas significativement affecté le type de placement des pieds restant pratiquement similaire entre les masses de 10 kg et de 20 kg.

Le tableau 7.3 examine les moments résultants et asymétriques maximaux à L5/S1 en fonction des variables indépendantes (hauteur, distance, poids et cadence) et du placement des pieds. Dans cette analyse descriptive, on peut remarquer que les différences sur la grandeur des moments entre les types de placements de pieds ne sont pas majeures, mais tout de même observables. Par exemple, les moments résultants pour les hauteurs (Bas-bas et Bas-haut) sont supérieurs dans la condition {pieds faces} à celles des {pieds parallèles} et d'un {pied en avant}. On remarque aussi cette même tendance dans le cas de la distance des palettes, de la masse des charges et de la cadence de travail. Pour ce qui concerne les moments asymétriques, c'est le résultat contraire, c'est-à-dire que les moments apparaissent moins élevés pour les {pieds faces} par rapport aux deux autres types de placement de pieds {pieds faces} et {pieds parallèles}.

Tableau 7.1. Moyennes marginales des variables dépendantes pour chaque facteur et valeurs *P* associées aux effets principaux testés dans l'analyse de variance à mesures répétées à quatre voies

Facteurs Variables	Masse		Hauteur				Distance			Cadence	
	10 kg	20 kg	L-L	L-H	H-L	H-H	1,5 m	1,0 m	0,5 m	libre	R ¹
Moment Résultant Max (Nm)	160	194	238	254	117	100	179	178	174	174	180
Valeur <i>P</i>	< 0,001		< 0,001 *				0,224			0,013	
Moment Asymétrique Max (Nm)	49	62	54	53	61	53	58	55	53	51	59
Valeur <i>P</i>	< 0,001		0,014 ^a				0,088			< 0,001	
Torsion lombaire (°)	13	13	7	11	18	15	12	12	14	10	15
Valeur <i>P</i>	0,889		< 0,001 ^{d, k, l}				0,209			0,019	
Inclinaison tronc (°)	46	45	76	73	21	13	43	45	49	45	47
Valeur <i>P</i>	0,183		< 0,001 ^{a, c, e, h, i}				< 0,001 ^{m, n}			0,054	
Flexion genou(°)	39	44	60	64	22	19	45	42	37	44	39
Valeur <i>P</i>	0,027		< 0,001 ^{a, c, e, h}				< 0,001 ^{g, o}			0,004	
Durée (s)	1,7	1,8	2,1	1,8	1,8	1,4	2,2	1,6	1,5	2,0	1,6
Valeur <i>P</i>	0,026		< 0,001 ^{a, b, c, e, h}				< 0,001 *			< 0,001	

* Toutes les comparaisons paires sont différence significativement; ^a H-L > H-H; ^b L-L > L-H; ^c L-L > H-H; ^d L-H < H-L; ^e L-H > H-H; ^g 1,5 m > 0,5 m; ^h L-L > H-L; ⁱ L-H > H-L; ^j 1,5 m < 1,0 m; ^k L-L < H-H; ^l L-L < H-L; ^m 1,5 m < 0,5 m; ⁿ 1,0 m < 0,5 m; ^o 1,0 m > 0,5 m.

¹ R = Rapide

Tableau 7.2. Type de placement des pieds (fréquence en %) lors du lever en fonction des quatre différentes conditions expérimentales : hauteur, distance, masse, cadence

		Pieds faces	Un pied en avant	Pieds Parallèles
Hauteur	16 cm	78 % *	5 % *	17 % *
	116 cm	48 % *	5 % *	47 % *
Distance	0,5 m	73 % *	9 % *	18 % *
	1,0 m	67 % *	4 % *	29 % *
	1,5 m	47 % *	3 % *	50 % *
Masse	10 kg	61 %	6 %	33 %
	20 kg	65 %	4 %	31 %
Cadence	Libre	72 % *	3 % *	25 % *
	Rapide	54 % *	6 % *	40 % *
Tous		66 %	8 %	26 %

*Les caractères gras indiquent des effets statistiquement significatifs à l'intérieur de chacune des variables (P < 0,01).

Tableau 7.3. Effet de la hauteur des tablettes, de la distance des palettes, de la charge à soulever et de la cadence en fonction du placement des pieds sur les moments résultants et asymétriques maximaux à L5/S1 (moyenne et (écart-type)) à l'instant du lever

		Moments résultants (Nm)			Moments asymétriques (Nm)		
		Pieds faces	Un pied en avant	Pieds Parallèles	Pieds faces	Un pied en avant	Pieds Parallèles
Hauteur	Bas-bas	250 (52)	222 (40)	224 (36)	54 (17)	55 (16)	59 (20)
	Bas-haut	256 (54)	235 (60)	251 (49)	51 (17)	57 (20)	55 (18)
	Haut-bas	111 (34)	117 (41)	125 (41)	54 (19)	60 (26)	70 (26)
	Haut-haut	99 (26)	103 (44)	108 (36)	50 (18)	54 (28)	61 (24)
Distance (mètres)	1,5 m	193 (87)	158 (74)	148 (54)	55 (19)	59 (25)	76 (24)
	1,0 m	194 (87)	182 (81)	147 (61)	50 (16)	49 (17)	68 (22)
	0,5 m	204 (80)	177 (73)	150 (74)	51 (18)	62 (21)	56 (23)
Masse (kg)	10	175 (78)	154 (74)	139 (65)	47 (15)	53 (21)	57 (22)
	20	216 (87)	183 (76)	159 (67)	57 (19)	62 (25)	70 (25)
Cadence	Normale	191 (84)	161 (74)	139 (63)	50 (17)	56 (22)	61 (23)
	Rapide	204 (86)	170 (78)	154 (69)	56 (19)	57 (24)	65 (25)

7.4 Discussion

Les effets des variables indépendantes que sont la hauteur de prise, le poids de la charge ainsi que la cadence de travail sur le chargement lombaire ainsi que sur la posture du corps sont bien documentés dans la littérature. Ainsi, en prenant des caisses au sol plutôt qu'à hauteur de hanche, en augmentant la charge de 10 à 20 kg et en favorisant une cadence élevée, les charges vertébrales augmentent considérablement (Harari *et al.*, 2019; Hoozemans *et al.*, 2008; Lavender *et al.*, 2003; Plamondon *et al.*, 2014; Plamondon, Larivière *et al.*, 2012; Plamondon *et al.*, 2017). Pour ces mêmes conditions, le manutentionnaire est généralement forcé d'adopter une inclinaison du tronc prononcée augmentant les contraintes au niveau des structures lombaires et au niveau des genoux (Plamondon *et al.*, 2014; Plamondon, Larivière *et al.*, 2012; Plamondon *et al.*, 2017). Aussi, une cadence de travail élevée a pour conséquence d'accroître les vitesses de lever qui provoque une augmentation du chargement vertébral maximal (dû à la composante dynamique du mouvement (Buseck *et al.*, 1988; Bush-Joseph *et al.*, 1988; de Looze, Kingma, Thunnissen, van Wijk et Toussaint, 1994; Dolan, Earley et Adams, 1994; Gagnon et Gagnon, 1992; Jager et Luttmann, 1992; Lavender *et al.*, 2003; Lavender *et al.*, 1999). Donc, nos résultats confirment ce qui était déjà bien connu.

La distance de transfert entre les lieux de prise et de dépôt a été principalement étudiée sous l'aspect de la posture, dans laquelle la flexion et la torsion lombaire étaient réduites à mesure que la distance de transfert augmentait, en particulier lors de la phase de dépôt (Jorgensen, Handa, Veluswamy et Bhatt, 2005; Kim, Mehta, Weiler et Lavender, 2014; Mehta *et al.*, 2014). Dans notre cas, c'est encore au niveau de la posture que les effets ont été les plus importants en observant au lever une posture plus droite à une distance des palettes de 1,5 m (par rapport à 0,5 m); c'est-à-dire une diminution de l'inclinaison du tronc accompagnée d'une plus grande flexion des genoux, au détriment, par contre d'une augmentation de la durée de transfert.

La première de nos hypothèses initiales était de vérifier que les conditions avec restrictions des pieds (0,5 m, 1,0 m et 1,5 m) seraient caractérisées par une forte asymétrie de posture au niveau du dos. Cela n'apparaît pas être le cas puisque cette asymétrie n'a pas significativement changé entre les trois conditions expérimentales. Ce résultat peut s'expliquer parce que les manutentionnaires étaient libres dans la manière de se placer et de se déplacer. Ainsi, une majorité d'entre eux (73 % - tableau 7.2), ont préféré, à une distance de 0,5 m, un lever de face {pieds faces} à la prise limitant ainsi les effets d'asymétrie de posture. D'un autre côté, les résultats au dépôt n'étant pas encore connus, il se pourrait que ce soit dans cette phase que cette asymétrie soit survenue en autant que les manutentionnaires n'aient pas pu déplacer leurs pieds de la position de départ. Il reste donc à vérifier ce qui s'est passé lors du dépôt.

Une seconde hypothèse consistait à savoir si une cadence imposée (rapide) aurait pour effet d'amplifier l'impact des conditions avec restrictions. Il apparaît que c'est le cas au lever. En augmentant la cadence de la condition libre à celle imposée rapide, les manutentionnaires ont modifié leur placement des pieds à la prise passant pour les {pieds faces} de 72 % à 54 % et pour les {pieds parallèles} de 25 % à 40 %. Certains manutentionnaires ont donc opté pour une approche qui augmente significativement l'asymétrie de posture de 10° à 15° ainsi que l'asymétrie de chargement de 51 Nm à 59 Nm (tableau 7.1), mais qui facilite un transfert plus rapide.

Une dernière hypothèse se devait de vérifier si une stratégie de placement des pieds avait une influence sur les chargements au dos. Le tableau 7.3 confirme cette hypothèse quoique des tests

statistiques plus poussés devront être réalisés pour s'assurer de la validité du résultat. Ainsi, le moment maximal résultant au lever apparaît être supérieur lorsque le placement des pieds se fait de face {pieds faces} en comparaison aux deux autres placements {pieds parallèles} et {un pied en avant}. Par contre, le placement des {pieds parallèles} semble être la stratégie pour laquelle les moments asymétriques sont les plus élevés. Ces mêmes résultats se retrouvent au chapitre 4 (section 4.4.3) et donc confirment ceux du présent chapitre. Le choix d'une stratégie plutôt que d'une autre a donc ses avantages comme ses inconvénients sur la grandeur des moments. Il faudrait examiner dans quelles circonstances une stratégie plutôt qu'une autre est favorable pour minimiser les efforts et offre sur une longue durée une meilleure protection aux blessures.

Limitations : Les résultats présentés dans ce chapitre sont partiels en raison de la durée limitée de cette recherche. Les données seront retraitées de manières plus exhaustives dans le futur et d'autres analyses seront prévues pour exploiter toutes les conditions expérimentales qui ont été réalisées lors de cette recherche. Par exemple, les résultats à l'instant du dépôt et lors de la phase de déplacement restent à traiter pour une étude complète de la phase de transfert.

7.5 Conclusion

Cette étude sur les stratégies de placement des pieds de manutentionnaires a permis de vérifier qu'au moment de la prise : 1) la distance de transfert avait un effet sur la posture du manutentionnaire; 2) la condition avec restriction d'espace n'avait pas augmenté l'asymétrie de posture; 3) la cadence rapide imposée augmentait l'asymétrie de posture; 4) les moments résultants et asymétriques étaient influencés par le placement des pieds. Ces résultats font valoir l'importance de considérer les placements des pieds comme facteur important à observer pour minimiser les efforts et offrir une meilleure protection aux blessures.

8. RETOMBÉES DE L'ÉTUDE

8.1 Objectifs et retombées

Cette recherche avait pour principal objectif de s'approprier la méthode de Wagner *et al.* (2009) et de Wagner *et al.* (2010) en l'adaptant à nos besoins et à valider la méthode améliorée en permettant de quantifier les déplacements des manutentionnaires (**Ma**). Il est clair que cet objectif a été pleinement atteint. Dans une première phase, une méthode de classification inspirée de la méthode de Wagner *et al.* (2009) et de Wagner *et al.* (2010) a été développée pour déterminer les patrons de déplacements des pieds les plus communs (chapitre 3) et dans une seconde phase pour évaluer les différences dans les poses de placements et de déplacements des pieds de Ma experts et novices (chapitre 4). Comme cette méthode d'observation est plutôt longue et fastidieuse, nous avons développé une méthode d'apprentissage automatique pour accélérer le processus de traitement des données (chapitre 5), puis valider le tout par une comparaison entre les données observées et les données classifiées automatiquement (chapitre 6). Enfin, en dernier lieu, une expérience en laboratoire a été effectuée afin d'appliquer la méthode de détection des pas lors d'activités de manutention manuelle (chapitre 7).

Dans les retombées majeures, nous avons maintenant une méthode pour classifier par observations et de façon automatique les placements des pieds. Aussi, de nouvelles connaissances sur les stratégies de placement et de déplacement des pieds chez les experts et les novices ont été ajoutées ce qui permettra de bonifier des programmes de formation en manutention. À titre d'exemple, les experts ont tendance à opter pour une stratégie de déplacement des pieds plus statique et progressive, alors que les novices sont plus fluides et variables. Aussi, les stratégies de placement des pieds ont des impacts sur les moments résultants et asymétriques à l'instant du lever.

8.2 Les hypothèses de recherches

Quatre hypothèses de recherches ont été formulées :

1. Les Ma experts auront des stratégies de déplacement des pieds peu variables et différents des novices :
 - ✓ Cette hypothèse s'est avérée correcte.
2. Le type de placements des pieds aura une influence sur les chargements au dos :
 - ✓ Cette hypothèse s'est avérée correcte.
3. Les conditions avec restrictions des pieds seront caractérisées par une forte asymétrie de posture au niveau du dos :
 - ✗ Cette hypothèse n'a pas été vérifiée parce que les manutentionnaires ont plutôt opté pour un placement des pieds de face à l'instant de prise, limitant l'asymétrie de posture au dos.
4. La cadence imposée aura pour effet d'amplifier l'impact des conditions avec restrictions en modifiant leur placement des pieds :
 - ✓ Cette hypothèse s'est révélée correcte.

8.3 Limites de l'étude

Certains résultats (plus particulièrement au chapitre 7) n'ont été que partiellement traités en raison de la durée limitée de cette recherche. En fait, il est rarement possible d'exploiter l'ensemble des données dans une seule phase. Toutefois, comme pour d'autres projets passés (Plamondon *et al.*, 2010 : expert-novice en manutention), les données recueillies feront l'objet d'analyses approfondies qui seront ultérieurement publiées dans des revues savantes.

Comme pour toutes études, des limites expérimentales diminuent les impacts que peuvent avoir ce type de recherches lorsqu'ils sont appliqués dans d'autres contextes. Ainsi, toutes les données expérimentales ont été collectées en laboratoire. Par conséquent, il n'est pas certain que les résultats obtenus soient valides dans un milieu de travail où les activités de manutention sont beaucoup plus complexes et variées. Le nombre de participants aux études, les différences individuelles, les activités de manutention explorées, l'utilisation de caisses uniquement, la présence de capteurs sur la peau des participants, tous ces facteurs et de nombreux autres peuvent affecter la manière dont les manutentionnaires opèrent et modifier leur comportement. Par conséquent, il y a lieu d'être prudent dans la généralisation et dans l'interprétation des résultats. D'un autre côté, la méthode développée est applicable sur le terrain et que certains résultats demeurent valides dans le milieu de travail. Il est clair que d'autres études seront nécessaires pour mieux documenter les stratégies de placement et de déplacements des pieds des Ma.

8.4 Conclusion finale

Cette recherche avait pour principal objectif de s'approprier une méthode d'observation de placements et de déplacements des pieds en l'adaptant à nos besoins et à valider la méthode améliorée. La méthode s'est avérée utile pour quantifier les déplacements des pieds des manutentionnaires et pour caractériser certaines stratégies de manutentionnaires experts et novices. Cette méthode devrait servir à mieux documenter les déplacements des manutentionnaires en laboratoire et les perspectives sont d'effectuer cette classification en entreprise.

BIBLIOGRAPHIE

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists. (2014). *Document of the threshold limit values for physical agent* (7^e éd.). Cincinnati, OH: ACGIH.
- Adamson, M. B., Gilmore, G., Stratton, T. W., Baktash, N. et Jog, M. S. (2019). Medication status and dual-tasking on turning strategies in Parkinson disease. *Journal of the Neurological Sciences*, 396, 206-212. doi: 10.1016/j.jns.2018.11.028
- Atiya, A. F. (2005). Estimating the posterior probabilities using the k-nearest neighbor rule. *Neural Computation*, 17, 731-740.
- Authier, M., Gagnon, M. et Lortie, M. (1995). Handling techniques: The influence of weight and height for experts and novices. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 1(3), 262-275.
- Authier, M., Lortie, M. et Gagnon, M. (1996). Manual handling techniques: Comparing novices and experts. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 17(5), 419-429.
- Ayoub, M. M. et Mital, A. (1989). *Manual materials handling*. New York, NY: Taylor & Francis.
- Bakker, E. W., Verhagen, A. P., van Trijffel E., Lucas, C. et Koes, B. W. (2009). Spinal mechanical load as a risk factor for low back pain: A systematic review of prospective cohort studies. *Spine*, 34(8), E281-E293.
- Baril-Gingras, G. et Lortie, M. (1995). The handling of objects other than boxes: Univariate analysis of handling techniques in a large transport company. *Ergonomics*, 38(5), 905-925.
- Bernard, B. P., Putz-Anderson, V., Burt, S. E., Cole, L. L., Fairfields-Estill, C., Fine, L. J., . . . Tanaka, S. (1997). *Musculoskeletal disorders and workplace factors: A critical review of epidemiologic evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back*. Tiré de <https://www.cdc.gov/niosh/docs/97-141/pdfs/97-141.pdf?id=10.26616/NIOSH PUB97141>
- Bernard, T. M., Ayoub, M. M. et Lin, C. J. (1999). Effects of speed of lift on static and inertial moments at the joints. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 24(1), 39-47.
- Bhatt, H., Pieruccini-Faria, F. et Almeida, Q. J. (2013). Dynamics of turning sharpness influences freezing of gait in Parkinson's disease. *Parkinsonism & Related Disorders*, 19(2), 181-185.
- Borg, A. V. G. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14(5), 377-381.
- Boucher, A., Duguay, P., Prud'homme, P. et Busque, M.-A. (2019). *Lésions professionnelles acceptées qui sont des TMS liés à la manutention, Québec, 2013 à 2017*. Montréal, QC: IRSST. [Données non publiées].
- Burdorf, A. et Sorock, G. (1997). Positive and negative evidence of risk factors for back disorders. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 23(4), 243-256.
- Buseck, M., Schipplein, O. D., Andersson, G. B. J. et Andriacchi, T. P. (1988). Influence of dynamic factors and external loads on the moment at the lumbar spine in lifting. *Spine*, 13(8), 918-921.
- Bush-Joseph, C., Schipplein, O., Andersson, G. B. J. et Andriacchi, T. P. (1988). Influence of dynamic factors on the lumbar spine moment in lifting. *Ergonomics*, 31(2), 211-216.
- Byrt, T., Bishop, J. et Carlin, J. B. (1993). Bias, prevalence and kappa. *Journal of Clinical Epidemiology*, 46(5), 423-429.
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37-46. doi: 10.1177/001316446002000104

- da Costa, B. R. et Vieira, E. R. (2010). Risk factors for work-related musculoskeletal disorders: A systematic review of recent longitudinal studies. *American Journal of Industrial Medicine*, 53(3), 285-323.
- Davis, K. G., Splittstoesser, R. E. et Marras, W. S. (2003). Kinematic contribution and synchronization of the trunk, hip, and knee during free-dynamic lifting. *Occupational Ergonomics*, 3(2), 99-108.
- Davis, K. G. et Marras, W. (2005). Load spatial pathway and spine loading: How does lift origin and destination influence low back response? *Ergonomics*, 48(8), 1031-1046.
- de Looze, M. P., Kingma, I., Thunnissen, W., van Wijk, M. J. et Toussaint, H. (1994). The evaluation of a practical biomechanical model estimating lumbar moments in occupational activities. *Ergonomics*, 37(9), 1495-1502.
- Delisle, A., Gagnon, M. et Desjardins, P. (1996). Load acceleration and footstep strategies in asymmetrical lifting and lowering. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2(3), 185-195.
- Delisle, A., Gagnon, M. et Desjardins, P. (1998). Knee flexion and base of support in asymmetrical handling: Effects on the worker's dynamic stability and the moments of the L5/S1 and knee joints. *Clinical Biomechanics*, 13(7), 506-514.
- Delisle, A., Gagnon, M. et Desjardins, P. (1999). Kinematic analysis of footstep strategies in asymmetrical lifting and lowering tasks. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 23(5-6), 451-460.
- Denis, D., Lortie, M. et Rossignol, M. (2000). Observation procedures characterizing occupational physical activities: Critical review. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 6(4), 463-491.
- Denis, D., Lortie, M. et Bruxelles, M. (2002). Impact of observers' experience and training on reliability of observations for a manual handling task. *Ergonomics*, 45(6), 441-454.
- Denis, D., Lortie, M., St-Vincent, M., Gonella, M., Plamondon, A., Delisle, A. et Tardif, J. (2011). *Programme de formation participative en manutention manuelle : fondements théoriques et approche proposée* (Rapport n° R-690). Montréal, QC: IRSST.
- Denis, D., Lortie, M., St-Vincent, M., Gonella, M., Plamondon, A., Delise, A. et Tardif, J. (2013). *Participatory training in manual handling: Theoretical foundations and proposed approach* (Rapport n° R-784). Montréal, QC: IRSST.
- Dolan, P., Earley, M. et Adams, M. A. (1994). Bending and compressive stresses acting on the lumbar spine during lifting activities. *Journal of Biomechanics*, 27(10), 1237-1248.
- Drury, C. G. (1985). Influence of restricted space on manual materials handling. *Ergonomics*, 28(1), 167-175.
- Dumas, R., Cheze, L. et Verriest, J. P. (2007). Adjustments to McConville et al. and Young et al. body segment inertial parameters. *Journal of Biomechanics*, 40(3), 543-553.
- Eliasson, K., Palm, P., Nyman, T. et Forsman, M. (2017). Inter- and intra- observer reliability of risk assessment of repetitive work without an explicit method. *Applied Ergonomics*, 62, 1-8. doi: 10.1016/j.apergo.2017.02.004
- Escamilla, R. F., Fleisig, G. S., Zheng, N., Lander, J. E., Barrentine, S. W., Andrews, J. R., . . . Moorman, C. T. (2001). Effects of technique variations on knee biomechanics during the squat and leg press. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(9), 1552-1566.
- Faber, G. S., Kingma, I. et van Dieën, J. H. (2011). Effect of initial horizontal object position on peak L5/S1 moments in manual lifting is dependent on task type and familiarity with alternative lifting strategies. *Ergonomics*, 54(1), 72-81.
- Feinstein, A. R. et Cicchetti, D. V. (1990). High agreement but low Kappa: I. The problems of two paradoxes. *Journal of Clinical Epidemiology*, 43(6), 543-549.

- Fino, P. C., Frames, C. W. et Lockhart, T. E. (2015). Classifying step and spin turns using wireless gyroscopes and implications for fall risk assessments. *Sensors*, 15(5), 10676-10685.
- Forcier, I., Beaugrand, S., Lortie, M., Lapointe, C., Lemaire, J., Kuorinka, I., . . . Buckle, P. (2001). *L'ABC de l'utilisation d'un questionnaire sur la santé musculosquelettique : de la planification à la diffusion des résultats* (Guide technique n° AG-270). Montréal, QC: IRSST.
- Gagnon, D. et Gagnon, M. (1992). The influence of dynamic factors on triaxial net muscular moments at the L5/S1 joint during asymmetrical lifting and lowering. *Journal of Biomechanics*, 25(8), 891-901.
- Gagnon, M., Plamondon, A., Gravel, D. et Lortie, M. (1996). Knee movement strategies differentiate expert from novice workers in asymmetrical manual materials handling. *Journal of Biomechanics*, 29(11), 1445-1453.
- Gagnon, M. (2003). The efficacy of training for three manual handling strategies based on the observation of expert and novice workers. *Clinical Biomechanics*, 18(7), 601-611.
- Gagnon, M. (2005). Contribution des travailleurs dans l'élaboration des programmes d'entraînement à la manutention sécuritaire: identification des stratégies, évaluation biomécanique et implantation. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, 7(2). Tiré de <http://www.pistes.uqam.ca/v7n2/articles/v7n2a5.htm>
- Gallagher, S. et Schall, M. C. (2017). Musculoskeletal disorders as a fatigue failure process: Evidence, implications and research needs. *Ergonomics*, 60(2), 255-269.
- Golyski, P. R. et Hendershot, B. D. (2017). A computational algorithm for classifying step and spin turns using pelvic center of mass trajectory and foot position. *Journal of Biomechanics*, 54, 96-100. doi: 10.1016/j.jbiomech.2017.01.023
- Granata, K. P., Marras, W. S. et Davis, K. G. (1999). Variation in spinal load and trunk dynamics during repeated lifting exertions. *Clinical Biomechanics*, 14(6), 367-375.
- Graveling, R. A., Melrose, A. S. et Hanson, M. A. (2003). *The principles of good manual handling: Achieving a consensus*. Londres, Angleterre: HSE Books.
- Greenland, K. O., Merryweather, A. S. et Bloswick, D. S. (2013). The effect of lifting speed on cumulative and peak biomechanical loading for symmetric lifting tasks. *Safety and Health at Work*, 4(2), 105-110.
- Good, E. S. et Suntay, W. J. (1983). A joint coordinate system for the clinical description of three-dimensional motions: Application of the knee. *Journal of Biomechanical Engineering*, 105(2), 136-144. doi: 10.1115/1.3138397
- Halilaj, E., Rajagopal, A., Fiterau, M., Hicks, J. L., Hastie, T. J. et Delp, S. L. (2018). Machine learning in human movement biomechanics: Best practices, common pitfalls, and new opportunities. *Journal of Biomechanics*, 81, 1-11. doi: 10.1016/j.jbiomech.2018.09.009
- Harari, Y., Riemer, R. et Bechar, A. (2019). Differences in spinal moments, kinematics and pace during single-task and combined manual material handling jobs. *Applied Ergonomics*, 81. doi: 10.1016/j.apergo.2019.06.002
- Heneweer, H., Staes, F., Aufdemkampe, G., van Rijn, M. et Vanhees, L. (2011). Physical activity and low back pain: A systematic review of recent literature. *European Spine Journal*, 20, 826-845. doi: 10.1007/s00586-010-1680-7
- Hof, A. L. (1992). An explicit expression for the moment in multibody systems. *Journal of Biomechanics*, 25(10), 1209-1211.
- Hoozemans, M. J. M., Kingma, I., de Vries, W. H. et van Dieen, J. H. (2008). Effect of lifting height and load mass on low back loading. *Ergonomics*, 51(7), 1053-1063.

- Hou, Y., Zurada, J. M., Karwowski, W., Marras, W. S. et Davis, K. (2007). Estimation of the dynamic spinal forces using a recurrent fuzzy neural network. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 37(1), 100-109.
- Hu, B., Dixon, P. C., Jacobs, J. V., Dennerlein, J. T. et Schiffman, J. M. (2018). Machine learning algorithms based on signals from a single wearable inertial sensor can detect surface- and age-related differences in walking. *Journal of Biomechanics*, 71, 37-42. doi: 10.1016/j.jbiomech.2018.01.005
- International Standard Organization. (2003). *Ergonomie : manutention manuelle : partie 1*. Norme ISO 11228-1:2003 (F). Genève, Suisse: ISO.
- Jager, M. et Luttmann, A. (1992). The load on the lumbar spine during asymmetrical bi-manual materials handling. *Ergonomics*, 35(7-8), 783-805.
- Jensen, R. K. (1978). Estimation of the biomechanical properties of three body types using a photogrammetric method. *Journal of Biomechanics*, 11(8-9), 349-358.
- Johnson, W. R., Mian, A., Donnelly, C. J., Lloyd, D. et Alderson, J. (2018). Predicting athlete ground reaction forces and moments from motion capture. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 56, 1781-1792. doi: 10.1007/s11517-018-1802-7
- Jorgensen, M. J., Handa, A., Veluswamy, P. et Bhatt, M. (2005). The effect of pallet distance on torso kinematics and low back disorder risk. *Ergonomics*, 48(8), 949-963.
- Kelsey, J. L., Githens, P. B., White, A. A., Holford, T. R., Walter, S. D., O'Connor, T., . . . Calogero, J. A. (1984). An epidemiologic study of lifting and twisting on the job and risk for acute prolapsed lumbar intervertebral disc. *Journal of Orthopedic Research*, 2(1), 61-66.
- Keyserling, W. M. (2000). Workplace risk factors and occupational musculoskeletal disorders: Part 1: A review of biomechanical and psychophysical research on risk factors associated with low-back pain. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 61(2), 39-50.
- Kim, H. K. et Zhang, Y. (2017). Estimation of lumbar spinal loading and trunk muscle forces during asymmetric lifting tasks: Application of whole-body musculoskeletal modelling in OpenSim. *Ergonomics*, 60(4), 563-576.
- Kim, T. H., Mehta, J. P., Weiler, M. R. et Lavender, S. A. (2014). The effects of transfer distance on spine kinematics when placing boxes at different heights. *Applied Ergonomics*, 45(4), 936-942.
- Kingma, I., van Dieën, J. H., de Looze, M., Toussaint, H. M., Dolan, P. et Baten, C. T. M. (1998). Asymmetric low back loading in asymmetric lifting movements is not prevented by pelvic twist. *Journal of Biomechanics*, 31(6), 527-534.
- Kingma, I., Bosch, T., Bruins, L., et van Dieën, J. H. (2004). Foot positioning instruction, initial vertical load position and lifting technique: Effects on low back loading. *Ergonomics*, 47(13), 1365-1385.
- Kirby, R., Price, N. et MacLeod, D. (1987). The influence of foot position on standing balance. *Journal of Biomechanics*, 20(4), 423-427.
- Kuiper, J. I., Burdorf, A., Verbeek, J. H. A. M., Frings-Dresen, M. H. W., van Der Beek, A. J. et Viikari-Juntura, E. R. A. (1999). Epidemiologic evidence on manual materials handling as a risk factor for back disorders: A systematic review. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 24(4), 389-404.
- Landis, J. R. et Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-174.
- Lavender, S. A., Li, Y. C., Andersson, G. B. J. et Natarajan, R. N. (1999). The effects of lifting speed on the peak external forward bending, lateral bending, and twisting spine moments. *Ergonomics*, 42(1), 111-125.

- Lavender, S. A., Andersson, G. B. J., Schipplein, O. D. et Fuentes, H. J. (2003). The effects of initial lifting height, load magnitude, and lifting speed on the peak dynamic L5/S1 moments. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 31(1), 51-59.
- Lavender, S. A., Lorenz, E. P. et Andersson, G. B. J. (2007). Can a new behaviorally oriented training process to improve lifting technique prevent occupationally related back injuries due to lifting? *Spine*, 32(4), 487-494.
- Lorenz, E. P., Lavender, S. A. et Andersson, G. B. J. (2002). Determining what should be taught during lift-training instruction. *Physiotherapy Theory and Practice*, 18(1), 175-191.
- Lortie, M. (2002). Manutention : prise d'information et décision d'action. *Le travail humain*, 3(65) 193-216.
- Lötters, F., Burdorf, A., Kuiper, J. et Miedema, H. (2003). Model for the work-relatedness of low-back pain. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 29(6), 431-440.
- Lu, T. W. et O'Connor, J. J. (1999). Bone position estimation from skin marker co-ordinates using global optimization with joint constraints. *Journal of Biomechanics*, 32(2), 129-134.
- Madeleine, P., Lundager, B., Voigt, M. et Arendt-Nielsen, L. (2003). Standardized low-load repetitive work: Evidence of different motor control strategies between experienced workers and a reference group. *Applied Ergonomics*, 34(6), 533-542.
- Madeleine, P., Voigt, M. et Mathiassen, S. E. (2008). The size of cycle-to-cycle variability in biomechanical exposure among butchers performing a standardised cutting task. *Ergonomics*, 51(7), 1078-1095.
- Marras, W. S., Ferguson, S. A., Burr, D., Davis, K. G. et Gupta, P. (2004). Spine loading in patients with low back pain during asymmetric lifting exertions. *Spine*, 4(1), 64-75.
- Marras, W. S., Parakkat, J., Chany, A. M., Yang, G., Burr, D. et Lavender, S. A. (2006). Spine loading as a function of lift frequency, exposure duration, and work experience. *Clinical Biomechanics*, 21(4), 345-352.
- Marras, W. S. (2008). *The working back: A system view*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Mehta, J. P., Kim, T. H., Weiler, M. R. et Lavender, S. A. (2014). Effects of transfer distance on spine kinematics for de-palletizing tasks. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 11(1), 1-8.
- Mehrizi, R., Peng, X., Xu, X., Zhang, S. et Li, K. (2019). A deep neural network-based method for estimation of 3D lifting motions. *Journal of Biomechanics*, 84, 87-93. doi: 10.1016/j.jbiomech.2018.12.022
- Mital, A., Nicholson, A. S. et Ayoub, M. M. (1997). *A guide to manual materials handling* (2^e éd.) Londres, Angleterre: Taylor & Francis.
- Muller, A., Pontonnier, C., Puchaud, P. et Dumont, G., (2019). CusToM: A Matlab toolbox for musculoskeletal 523 simulation. *Journal of Open Source Software*, 4(33), 1-3.
- Muller, A., Vallée-Marcotte, J., Robert-Lachaine, X., Mecheri, H., Larue, C., Corbeil, P. et Plamondon, A. (2019). A machine-learning method for classifying and analyzing foot placement: Application to manual material handling. *Journal of Biomechanics*, 97. doi : 10.1016/j.jbiomech.2019.109410
- National Research Council. (2001). *Musculoskeletal disorders and the workplace: Low back and upper extremities*, Washington, DC: National Academy Press.
- Nelson, N. A. et Hughes, R. E. (2009). Quantifying relationships between selected work-related risk factors and back pain: A systematic review of objective biomechanical measures and cost-related health outcomes. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(1), 202
- Noguchi, K., Gel, Y., Brunner, E. et Konietschke, F. (2012). nparLD: An R software package for the nonparametric analysis of longitudinal data in factorial experiments. *Journal of Statistical Software*, 50(12), 1-23.

- Nurjannah, I. et Siwi, S. (2017). Guidelines for analysis on measuring interrater reliability of nursing outcome classification. *International Journal of Research in Medical Sciences*, 5(4), 1169-1175.
- Palm, P., Josephson, M., Mathiassen, S. E. et Kjellberg, K. (2016). Reliability and criterion validity of an observation protocol for working technique assessments in cash register work. *Ergonomics*, 59(6), 829-839.
- Plamondon, A., Gagnon, M. et Gravel, D. (1995). Moments at the L5/S1 joint during asymmetrical lifting: Effects of different load trajectories and initial load positions. *Clinical Biomechanics*, 10(3), 128-136.
- Plamondon, A., Delisle, A., Trimble, K., Desjardins, P. et Rickwood, T. (2006). Manual materials handling in mining: The effect of rod heights and foot positions when lifting "in-the-hole" drill rods. *Applied Ergonomics*, 37(6), 709-718.
- Plamondon, A., Denis, D., Bellefeuille, S., Delisle, A., Gonella, M., Salazar, E., . . . Nastasia, I. (2010). *Manutention : comparaison des façons de faire entre les experts et les novices* (Rapport n° R-663). Montréal, QC: IRSST.
- Plamondon, A., Denis, D., Larivière, C., Delisle, A., Gagnon, D., St-Vincent, M. et Nastasia, I. (2012). Les femmes manutentionnaires : un point de vue biomécanique et ergonomique (Rapport n° R-757). Montréal, QC: IRSST.
- Plamondon, A., Larivière, C., Delisle, A., Denis, D., Gagnon, D. et The IRSST MMH Research Group. (2012). Relative importance of expertise, lifting height and weight lifted on posture and lumbar external loading during a transfer task in manual material handling. *Ergonomics*, 55(1), 87-102.
- Plamondon, A., Delisle, A., Bellefeuille, S., Denis, D., Gagnon, D. et Larivière, C. (2014). Lifting strategies of expert and novice workers during a repetitive palletizing task. *Applied Ergonomics*, 45(3), 471-481.
- Plamondon, A., Larivière, C., Denis, D., Mecheri, H., Nastasia, I. (2017). Difference between male and female workers lifting the same relative load when palletizing boxes. *Applied Ergonomics*, 60, 93-102. doi : 10.1016/j.apergo.2016.10.014
- Puchaud, P., Sauret, C., Muller, A., Bideau, N., Dumont, G., Pillet, H. et Pontonnier, C. (2019). Accuracy and kinematics consistency of marker-based scaling approaches on a lower limb model: A comparative study with imagery data. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 23(3), 114-125.
- Snook, S. H. et Ciriello, V. (1991). The design of manual handling tasks: Revised tables of maximum acceptable weights and forces. *Ergonomics*, 34(9), 1197-1213.
- Srinivasan, D. et Mathiassen, S. E. (2012). Motor variability in occupational health and performance. *Clinical Biomechanics*, 27(10), 979-993.
- Vargha, A. et Delaney, H. D. (2000). A critique and improvement of the CL common language effect size statistics of McGraw and Wong. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 25(2), 101-132.
- Wagner, D. W., Kirschweg, R. L. et Reed, M. P. (2009). Foot motions in manual material handling transfer tasks: A taxonomy and data from an automotive assembly plant. *Ergonomics*, 52(3), 362-383.
- Wagner, D. W., Reed, M. P. et Chaffin, D. B. (2010). The development of a model to predict the effects of worker and task factors on foot placements in manual material handling tasks. *Ergonomics*, 53(11), 1368-1384.
- Wagner, D. W. et Reed, M. P. (2013). Step scaling and behaviour selection in a constrained set of manual material handling transfers. *Ergonomics*, 56(6), 964-976.

- Waters, T. R., Putz-Anderson, V., Garg, A. et Fine, L. J. (1993). Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. *Ergonomics*, 36(7), 749-776.
- Wongpakaran, N., Wongpakaran, T., Wedding, D. et Gwet, K. L. (2013). A comparison of Cohen's Kappa and Gwet's AC1 when calculating inter-rater reliability coefficients: A study conducted with personality disorder samples. *BMC Medical Research Methodology*, 13, 61. doi: 10.1186/1471-2288-13-61
- Wu, G., Siegler, S., Allard, P., Kirtley, C., Leardini, A., Rosenbaum, D., . . . Stokes, I. (2002). ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion: Part I: Ankle, hip, and spine. *Journal of Biomechanics*, 35(4), 543-548.
- Wu, G., van der Helm, F. C. T., Veeger, H. E. J., Makhsous, M., van Roy, P., Anglin, C., . . . Wang, X. (2005). ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion: Part II: Shoulder, elbow, wrist and hand. *Journal of Biomechanics*, 38(5), 981-992.
- Zhou, J., Dai, B. et Ning, X. (2013). The assessment of material handling strategies in dealing with sudden loading: Influences of foot placement on trunk biomechanics. *Ergonomics*, 56(10), 1569-1576.
- Zhou, J., Ning, X., Hu, B. et Dai, B. (2016). The influences of foot placement on lumbopelvic rhythm during trunk flexion motion. *Journal of Biomechanics*, 49(9), 1692-1697.

ANNEXE A : Représentations visuelles des quatre instants du cycle de manutention.

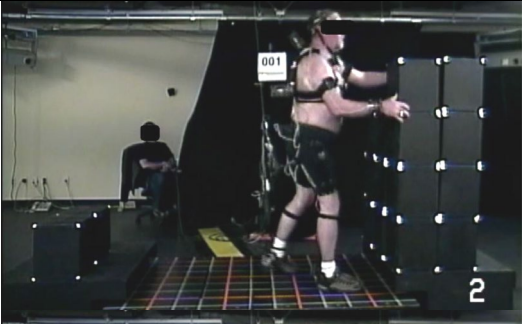
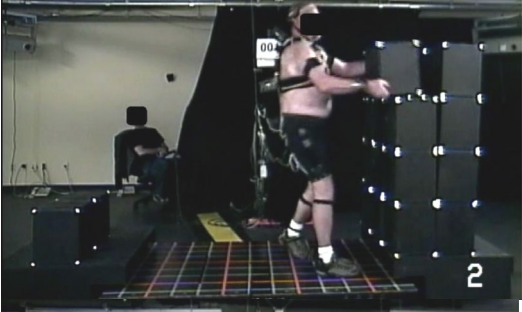
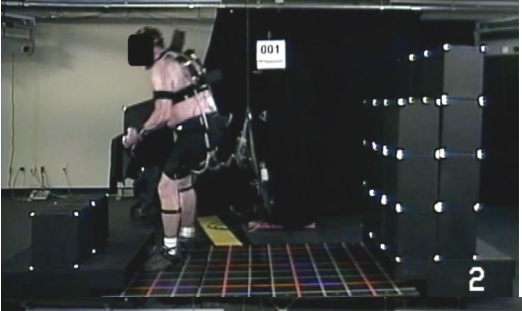
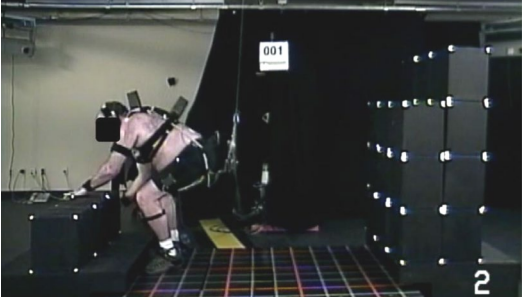
Instant clé	Critère	Photo
Premier contact	Les mains touchent la caisse	
Lever	La caisse n'est plus en contact avec la surface	
Prédépôt	Un pied dans la direction du dépôt Initiation du dépôt de la caisse	
Dépôt	La caisse touche la surface	

Figure A-1. Représentation visuelle des quatre instants du cycle de manutention.

ANNEXE B :
Représentations visuelles des déplacements aux quatre instants du cycle de manutention représentés par une pose {pieds faces}.

Déplacement	Diagramme
Fixe {N-M}	
Translation arrière {B-T}	
Translation avant {F-T}	
Pivot du pied arrière {P}	
Combinaison Pivot translation {P-T}	
Contrepoids {C}	

Figure B-2. Représentations visuelles d'un déplacement des pieds typique aux quatre instants du cycle de manutention débutant par une pose {Pieds faces}.

ANNEXE C : Représentations visuelles des déplacements pour la phase de transfert.

Transfert	Diagramme	Transfert	Diagramme
Fixe {N-M}		Pivot {P}	
Virage progressif {Pr}			
Virage ouvert {O}		Crabe {Cr}	

Figure C-3. Représentations visuelles des déplacements des pieds qui peuvent être observés durant la phase de transfert.