

Analyse du concept de marge de manœuvre en ergonomie du point de vue du contrôle de la motricité humaine

Philippe Corbeil
André Plamondon
Denys Denis

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1149-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, 2022
ISBN 978-2-89797-210-3 (PDF)

© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, 2022

IRSST - Direction des communications, de la veille et de la mobilisation des connaissances
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

Analyse du concept de marge de manœuvre en ergonomie du point de vue du contrôle de la motricité humaine

Philippe Corbeil¹, André Plamondon², Denys Denis³

¹ Université Laval

² IRSST

³ Université du Québec à Montréal

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1149-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

Ce travail aurait été impossible à réaliser sans la contribution de tous les acteurs qui ont participé de près ou de loin à la planification ou à la collecte des données expérimentales des trois études en laboratoire. Un remerciement est adressé aux 65 participants des différentes études.

Nos sincères remerciements à Hakim Mecheri pour le temps accordé au projet et l'aide fournie au traitement des données, et à Jean Leblond pour les précieux conseils concernant les analyses statistiques.

Enfin, des remerciements sont adressés à Jasmin Vallée-Marcotte, Samuel Trempe et Véronique Fecteau pour leur aide sur certaines sections du rapport, et aussi à Antoine Muller et Xavier Robert-Lachaine pour leurs commentaires constructifs sur le rapport.

À la mémoire de mon père (Claude Corbeil) qui a pris soin de me guider, m'encourager et me laisser voler de mes propres ailes. Tu as été et seras pour toujours une source d'inspiration dans toutes les sphères de ma vie. Repose en paix.

SOMMAIRE

Le concept de marge de manœuvre se définit comme la liberté dont dispose un travailleur pour élaborer différentes façons de travailler afin de répondre aux exigences de production, et ce, sans effet défavorable sur sa santé (Coutarel, Caroly, Vézina et Daniellou, 2015; St-Vincent *et al.*, 2011). Une forte charge de travail jumelée à une faible latitude décisionnelle restreint l'élaboration des gestes et pourrait pénaliser ainsi la santé des opérateurs. Les connaissances actuelles des façons de faire des manutentionnaires, qu'ils soient experts ou non, ne nous permettent pas d'apprécier dans sa totalité l'ampleur de cette liberté lorsqu'un individu doit répéter un même geste et comment la maîtrise de cette gestuelle diffère entre manutentionnaires.

Sur la base de trois études précédentes (Corbeil, Plamondon, Teasdale, Handrigan, Ten Have et Manzerolle, 2013; Plamondon, Denis, Bellefeuille, *et al.*, 2010; Plamondon, Denis, *et al.*, 2012) regroupant 65 manutentionnaires (experts ou novices hommes, femmes, manutentionnaires en surplus de poids ou de poids santé), trois objectifs spécifiques ont été répondus : 1. Documenter les variations intra-individuelles de la signature gestuelle propre à chaque manutentionnaire (signature gestuelle) et les variations interindividuelles; 2. Comprendre la relation entre les différents modes opératoires et les chargements au dos en fonction de différents contextes; 3. Identifier, s'il y a lieu, des sous-groupes homogènes de participants définis selon le niveau de sollicitation des structures musculosquelettiques au dos et ses variations et caractériser leurs modes opératoires prévalents et les variations connexes.

La tâche de manutention consistait à empiler quatre caisses, une caisse par-dessus l'autre, en s'assurant que l'empilement des caisses (15 kg ou 23 kg) soit en équilibre, et ensuite déposer l'une après l'autre ces caisses sur un convoyeur.

Ce rapport de recherche a permis de :

- Proposer une méthode pour définir la signature gestuelle permettant de caractériser la diversité motrice (choix des façons de faire) et la variabilité motrice (mouvement) adaptée à la manutention de charge;
- Mesurer l'ampleur de la variabilité motrice d'une tâche séquentielle en manutention et préciser les effets des facteurs externes sur la variabilité motrice :
 - o Effet Hauteur : La manutention de charge près du sol engendre, de manière générale, une réduction de la diversité des façons de faire et de la variabilité des mouvements. Les variations des chargements à L5/S1 ont augmenté au fur et à mesure que les charges manipulées se rapprochaient du sol.
 - o Effet Masse : L'augmentation de la masse a entraîné une diminution de la variabilité motrice et de la diversité motrice, peu importe la hauteur de manipulation de la charge. L'effet Masse a de plus engendré une augmentation nette de la sollicitation relative des structures musculosquelettiques du bas du dos et de ses variations.
 - o De manière globale, les experts hommes, ceux en surplus de poids et les manutentionnaires femmes se sont distingués de leurs comparses en adoptant des mouvements moins variables. Seuls les experts ont démontré une sélection de façons de faire plus constante lorsque comparés aux participants hommes novices.

- Effet Expertise : Les chargements en asymétrie au dos des experts étaient 33% inférieurs à ceux des manutentionnaires novices lorsque les caisses étaient déposées au sol et les sollicitations musculo-squelettiques au dos étaient plus constantes chez les experts comparativement aux novices.
 - De grandes différences interindividuelles ont été observées au sein même des groupes de manutentionnaires.
 - Les différences interindividuelles, dues à l'hétérogénéité marquée des participants constituant chacun des groupes de manutentionnaires, masquent potentiellement des effets marquants au niveau des préférences opératoires et la minimisation de certains coûts musculosquelettiques au dos.
- Identifier les coûts des différents modes opératoires et faire ressortir les dimensions du compromis :
- Trois variables clés de la signature gestuelle sont fortement associées aux chargements au dos : Position des pieds, Posture du corps et Asymétrie.
 - Il n'y a pas de solution unique qui satisfait tous les critères de performance désirés : une phase de transition rapide, de faibles moments de force à L5/S1 en sagittal et en asymétrie, de faibles moments de forces aux genoux, et un faible cumul des chargements lombaires.
 - Les deux tendances (technique sécuritaire, mode de transition directe) illustrent bien la notion du compromis : quand un risque est diminué, un autre est augmenté.
 - Il existe toutefois des façons de faire plus performantes que d'autres.
- Décortiquer la relation entre la variabilité motrice et les sollicitations musculosquelettiques au dos (coût lié à la préservation de la santé) :
- Proposition d'un modèle de classification selon les coûts initiaux au dos et ses variations qui sépare les participants qui présentent des hypo- des hypersollicitations au dos, et ceux qui varient peu leurs façons de faire (*Repeaters*) de ceux qui varient plus leur façon de faire d'une répétition à une autre (*Replacers*).
 - On y retrouve neuf paramètres discriminants qui se marient bien avec certaines règles d'action (alignement postural, bras de levier, équilibre, phase de transition) et qui intègrent les variations d'une répétition à une autre de la position et de l'orientation des pieds.
 - Quatre profils d'individus où l'on dénote certaines distinctions opératoires, mais au sein d'un même sous-groupe, on retrouve aussi des modes opératoires qui diffèrent parfois les uns des autres. Plusieurs des manutentionnaires experts se trouvent dans le groupe de participants qui présentent des hyposollicitations au dos et qui varient peu leurs façons de faire.

En situation de contraintes, la probabilité de sélectionner certaines façons de faire augmenterait substantiellement, écartant du coup d'autres solutions moins probables. Parmi l'ensemble des solutions motrices pour accomplir une tâche (à fort ou à faible risque), il y a toujours la possibilité qu'un travailleur puisse exécuter un mode opératoire à fort coût, par exemple qui occasionnerait un niveau très élevé de sollicitations mécaniques au dos. S'ajoute à cela le fait que chaque solution n'aboutit pas nécessairement aux mêmes résultats. Des fluctuations ou de la variabilité sont présentes à tous les niveaux de contrôle du geste.

Le passage de la marge de manœuvre à la préservation de troubles musculosquelettiques doit nécessairement bifurquer sous les projecteurs de la dimension motrice de l'activité mise en œuvre par les travailleurs. On doit s'intéresser à comment les travailleurs s'y prennent pour réaliser le travail exigé et aux coûts engendrés par l'exécution de leurs façons de faire. La diversité/variabilité motrice est un trait individuel. Il faut nécessairement individualiser nos approches préventives et comprendre davantage cette individualisation.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
SOMMAIRE	ii
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xi
1. INTRODUCTION	1
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES	3
3. OBJECTIFS DE RECHERCHE	7
4. MÉTHODOLOGIE	8
4.1 Participants.....	8
4.2 Protocole expérimental	8
4.3 Équipement et modélisation biomécanique.....	9
4.4 Analyse des données.....	10
4.4.1 Variables dépendantes.....	11
4.4.2 Signature gestuelle (ou variables liées aux modes opératoires)	12
4.5 Analyses des données.....	19
5. PREMIÈRE PARTIE – LES VARIATIONS INTRA- ET INTERINDIVIDUELLES : EFFETS DU CONTEXTE.....	21
5.1 Introduction.....	21
5.2 Méthodologie	21
5.2.1 Analyse statistique.....	21
5.3 Résultats.....	22
5.3.1 Variations intra-individuelles.....	22
5.3.2 Variations interindividuelles	37
5.4 Discussion	42
6. DEUXIÈME PARTIE – IMPACT DE LA SIGNATURE GESTUELLE SUR LES CHARGEMENTS AU DOS.....	46
6.1 Introduction.....	46
6.2 Méthodologie	46
6.2.1 Analyse statistique.....	46
6.3 Résultats – Signature gestuelle.....	46
6.4 Discussion	55

6.5	Conclusion.....	60
6.6	Sommaire à l'intention des praticiens.....	60
7.	TROISIÈME PARTIE – CLASSIFICATION DES INDIVIDUS.....	63
7.1	Introduction.....	63
7.2	Méthodologie	64
7.2.1	Analyse statistique.....	64
7.3	Résultats.....	66
7.3.1	Classification en sous-groupes.....	66
7.3.2	Analyse discriminante.....	70
7.3.3	Variation intra-sous-groupe	73
7.3.4	Comparaisons inter-sous-groupes.....	74
7.4	Discussion	77
7.5	Conclusion.....	81
7.6	Sommaire des résultats à l'intention des praticiens.....	81
8.	DISCUSSION	84
8.1	Transférabilité du concept de signature	84
8.2	Marge de manœuvre	86
8.3	Expertise.....	90
8.4	Apologie de la répétition	93
8.5	Limitations	94
9.	CONCLUSION.....	97
	BIBLIOGRAPHIE	100
	ANNEXE A : Classification des différentes stratégies de manutention en fonction de l'angle d'inclinaison du tronc et l'angle articulaire du genou	108
	ANNEXE B	111
B.I	En complément à la section sur la signature gestuelle (soulèvement).....	111
B.II	En complément à la section sur la signature gestuelle (dépôt).....	112
	ANNEXE C	113
C.I	En complément à la section sur la classification en sous-groupes	113
C.II	Signature gestuelle de deux participants : sommaire des huit conditions.....	115

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Descriptions des paramètres de la signature gestuelle	13
Tableau 2.	Coefficients de corrélation entre les variables choisies pour caractériser le paramètre Fluidité et travail mécanique de la signature gestuelle et aussi la durée du transfert.....	17
Tableau 3.	Sommaire des statistiques descriptives des variables liées à la posture du corps, à la coordination inter segmentaire du genou et du dos (plan sagittal) et à l'asymétrie du dos au moment du soulèvement des caisses du diable et du dépôt des caisses sur le diable.	23
Tableau 4.	Sommaire des résultats des équations d'estimation généralisées concernant le soulèvement et le dépôt d'une caisse à une des quatre hauteurs sur le diable.....	26
Tableau 5.	Sommaire des statistiques descriptives des variables liées au positionnement des pieds et au bras de résistance au moment du soulèvement des caisses du diable et du dépôt des caisses sur le diable, et à la prémanœuvre.....	28
Tableau 6.	Sommaire des résultats des équations d'estimation généralisées concernant le soulèvement et le dépôt d'une caisse à une des quatre hauteurs sur le diable.....	29
Tableau 7.	Sommaire des statistiques descriptives des variables liées à la secousse minimale, la distance verticale parcourue et la vitesse maximale résultante de la caisse durant le transfert, la durée du transfert des caisses et le pourcentage de la Durée du transfert où la caisse demeure à proximité du corps.....	31
Tableau 8.	Sommaire des résultats des équations d'estimation généralisées concernant le soulèvement et le dépôt d'une caisse à une des quatre hauteurs sur le diable.....	32
Tableau 9.	Comparaison des indices de dispersion moyens de chacun des paramètres de la signature gestuelle	34
Tableau 10.	Sommaire des statistiques descriptives des variables liées aux efforts au dos tel qu'estimé par les moments de force à L5/S1	36
Tableau 11.	Sommaire des résultats des équations d'estimation généralisées concernant le soulèvement et au dépôt d'une caisse à une des quatre hauteurs sur le diable.....	38
Tableau 12.	Sommaire des résultats des équations d'estimation généralisées concernant les tâches du convoyeur au diable (T1-aller) et du diable au convoyeur (T2-retour)	39
Tableau 13.	Tableau comparatif des principales combinaisons de paramètres de la signature gestuelle pour les soulèvements et les dépôts aux quatre hauteurs (H1 à H4) sur le diable	49
Tableau 14.	Principaux modes opératoires au soulèvement.....	61

Tableau 15.	Classification des sollicitations mécaniques lombaires.....	64
Tableau 16.	Degré d'association entre les moyennes et les écarts types des chargements au dos des 8 conditions de transfert de caisses de 15 kg	67
Tableau 17.	Tableau croisé des sous-groupes (1 à 4) et des catégories de participants	69
Tableau 18.	Coefficients des fonctions discriminantes canoniques standardisées.....	72
Tableau 19.	Matrice de structure présentant les corrélations intragroupes combinées entre les variables discriminantes et les variables des fonctions canoniques standardisées	72
Tableau 20.	Résultats du classement selon le modèle de l'analyse discriminante en considérant une probabilité a priori jugée équivalente entre les sous- groupes.....	73
Tableau 21.	Sommaire des différences entre les sous-groupes.....	83

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Montage expérimental de la tâche convoyeur à diable (configuration à 90°).	9
Figure 2.	La variabilité motrice s'exprime à différents niveaux dans l'exécution d'un geste effectué par un individu.	19
Figure 3.	Comparaison des moyennes des différentes catégories ou combinaisons de catégories de trois paramètres de la signature gestuelle de la tâche du diable au convoyeur (retour) – Soulèvement d'une caisse de 15 kg du sol (H1) : posture du corps (soulèvement), position des pieds (soulèvement) et asymétrie de charge (soulèvement).	47
Figure 4.	Comparaison des moyennes des différentes catégories ou combinaisons de catégories de trois paramètres de la signature gestuelle de la tâche du diable au convoyeur (retour) – Soulèvement d'une caisse de 15 kg d'une hauteur intermédiaire basse (H2).	51
Figure 5.	Comparaison des moyennes des différentes catégories ou combinaisons de catégories de trois paramètres de la signature gestuelle de la tâche du convoyeur au diable (aller) – Dépôt d'une caisse de 15 kg au sol (H1).	53
Figure 6.	Comparaison des moyennes des différentes catégories ou combinaisons de catégories de trois paramètres de la signature gestuelle de la tâche du convoyeur au diable (aller) – Dépôt d'une caisse de 15 kg à une hauteur intermédiaire basse (H2).	54
Figure 7.	Histogramme des valeurs moyennes des 8 conditions expérimentales de la moyenne et de l'écart type des moments de force L5/S1 en sagittal au soulèvement calculées à partir des douze répétitions par condition.	67
Figure 8.	Subdivision des participants (n=65) basée sur la médiane des moyennes de la moyenne et de l'écart type des moments de force normalisés à L5/S1 en sagittal au soulèvement.	68
Figure 9.	Quatre sous-groupes affichés pour chacune des 8 conditions (2 tâches x 4 hauteurs).	69
Figure 10.	Nuage de points de tous les sous-groupes selon les trois fonctions discriminantes canoniques.	71
Figure 11.	Résultats individuels de deux cas du sous-groupe 1 Hypersollicitation <i>Replacer</i> (un participant en A et un autre en B) et leurs principales combinaisons de paramètres de la signature gestuelle pour les soulèvements et les dépôts de charge aux quatre hauteurs (H1 à H4) sur le diable.	73
Figure 12.	Quatre cas types des différents sous-groupes (un par tableau) et leurs principales combinaisons de paramètres de la signature gestuelle pour les soulèvements et les dépôts de charge aux quatre hauteurs (H1 à H4) sur le diable.	75
Figure 13.	Pourcentage d'occurrence des combinaisons de paramètres de la signature par sous-groupe pour la condition diable au convoyeur : (A) H1 – sol et (B) H2 – hauteur intermédiaire basse.	76

Figure 14.	Définition des angles utilisés dans l'équation de Burgess-Limerick et Abernethy (1997) (en <i>orange</i>) et définition des angles utilisés dans la procédure de classification (en <i>bleu</i>).....	108
Figure 15.	Classification des différentes stratégies posturales de manutention en fonction de l'angle d'inclinaison du tronc (θ_i) et l'angle du genou (θ_g).....	110
Figure 16.	Comparaison des moyennes des différentes catégories ou combinaisons de catégories de trois paramètres de la signature gestuelle de la tâche du diable au convoyeur (retour) – Soulèvement d'une caisse de 15 kg d'une hauteur intermédiaire haute (H3).	111
Figure 17.	Comparaison des moyennes des différentes catégories ou combinaisons de catégories de trois paramètres de la signature gestuelle de la tâche du diable au convoyeur (retour) – Soulèvement d'une caisse de 15 kg d'une hauteur haute (H4).....	111
Figure 18.	Comparaison des moyennes des différentes catégories ou combinaisons de catégories de trois paramètres de la signature gestuelle de la tâche du convoyeur au diable (aller) – Dépôt d'une caisse de 15 kg à une hauteur intermédiaire haute (H3).	112
Figure 19.	Comparaison des moyennes des différentes catégories ou combinaisons de catégories de trois paramètres de la signature gestuelle de la tâche du convoyeur au diable (aller) – Dépôt d'une caisse de 15 kg à une hauteur haute (H4).....	112
Figure 20.	Pourcentage d'occurrence des combinaisons de paramètres de la signature par sous-groupe pour la condition diable au convoyeur, soit durant le soulèvement des caisses: (A) H3 – hauteur intermédiaire haute et (B) H4 – hauteur haute.....	113
Figure 21.	Pourcentage d'occurrence des combinaisons de paramètres de la signature par sous-groupe pour la condition convoyeur au diable, soit durant le dépôt des caisses: (A) H1-sol; (B) H2 – hauteur intermédiaire basse; (C) H3 – hauteur intermédiaire haute; (D) H4 – hauteur haute.....	114
Figure 22.	Sommaire de la signature gestuelle de deux participants (A. Expert-homme-poids santé; B. Novice-homme-poids santé).....	115

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AP : Antéro-postérieur

ML : Médio-latéral

H1 : Hauteur au niveau du sol

H2 : Hauteur intermédiaire basse (32 cm du sol ou hauteur équivalente à une caisse)

H3 : Hauteur intermédiaire haute (64 cm du sol ou hauteur équivalente à deux caisses empilées)

H4 : Hauteur haute (96 cm du sol ou hauteur équivalente à trois caisses empilées)

TMS : Trouble musculosquelettique

Concernant la signature gestuelle, certaines abréviations apparaissent régulièrement dans certains tableaux, figures, ou même dans le texte pour alléger le contenu :

De : Demi-squat

St : 'Stoop'

Sq : Squat

PF : Pieds-face

PD : Un pied devant

PP : Pieds-parallèle

Ce : Centrée

As : Asymétrique

1. INTRODUCTION

Le cas des manutentionnaires est préoccupant à cause de la forte prévalence de blessures musculosquelettiques. Ces travailleurs effectuent à répétition des tâches de manutention manuelle, et plus particulièrement celle de soulever une charge et de la déposer. Depuis deux décennies, la répétition de ces tâches est considérée comme l'un des principaux facteurs de risque de blessure au dos (Bernard, 1997; National Research Council [NRC], 2001).

Un des modèles de développement des troubles musculosquelettiques (TMS) s'appuie sur la notion de chargement qui reflète une combinaison pathogène de facteurs biomécaniques et psychosociaux (McGill, 2002). Une blessure surviendrait lorsqu'un chargement appliqué dépasse la limite de tolérance des tissus humains, qui elle-même fluctuerait en fonction du niveau d'exposition. Ainsi, l'apparition d'un TMS serait liée à une sollicitation excessive et renouvelée des structures musculosquelettiques du travailleur, compte tenu des différentes contraintes de la situation de travail et de leurs interactions respectives dans l'activité (Coutarel, 2004). Certains chercheurs proposent qu'il existe un lien entre le risque de développer un TMS et les faibles variations intra-individuelles dans le geste (qui se manifeste par une faible variabilité des modes opératoires) (Clot et Fernandez, 2005; Mathiassen, Moller et Forsman, 2003). Cette hypothèse expliquerait notamment les blessures de surutilisation lors de la course à pied (Davids, Glazier, Araujo et Bartlett, 2003; Hamill, Palmer et Van Emmerik, 2012). Une seule étude à notre connaissance a tenté de démontrer ce lien auprès de travailleurs : ceux dont le travail sur une chaîne de montage était plus variable étaient moins à risque de développer un TMS (Kilbom et Persson, 1987).

Le concept de marge de manœuvre, tiré de l'ergonomie, se définit comme la possibilité ou la liberté dont dispose un travailleur pour élaborer différentes façons de travailler afin de répondre aux exigences de production, et ce, sans effet défavorable sur sa santé (Coutarel *et al.*, 2015; St-Vincent *et al.*, 2011). La marge de manœuvre serait élaborée en fonction des contraintes, mais aussi des ressources externes et internes de chacun (Marquié, 1995). L'organisation des gestes (la signature gestuelle) résulte d'une élaboration au fil des parcours de vie et des itinéraires professionnels qui est propre à chacun des travailleurs. Une forte charge de travail jumelée à une faible latitude décisionnelle restreint l'élaboration des gestes, et pénalise ainsi la santé des opérateurs (Chassaing, 2010). À cet effet, Coutarel propose que les TMS soient « le reflet d'un déficit de marges de manœuvre du salarié dans son travail, ce déficit individuel étant lui-même lié à un déficit de marges de manœuvre de nombreux acteurs dans l'entreprise » (2004, p. 23). L'augmentation des marges de manœuvre serait un élément primordial à la prévention des TMS. Cet objectif s'inscrit dans la volonté de renforcer le « pouvoir d'agir » des travailleurs afin qu'ils soient des acteurs éclairés de la construction de leur santé et du développement de leur activité (Brunet et Riff, 2009; Clot, 2008). Bien que ce concept soit fortement implanté en ergonomie (St-Vincent *et al.*, 2011) et en réadaptation (Durand *et al.*, 2009, 2011), il n'existe pas ou peu de données quantitatives qui démontrent le lien entre cette liberté pouvant être exprimée par un potentiel de variabilité, et le risque de développer des TMS (Lémonie, 2019).

Or, les connaissances actuelles des modes opératoires des manutentionnaires, qu'ils soient experts ou non, ne nous permettent pas d'apprécier dans sa totalité l'ampleur des variations lorsqu'un individu doit répéter un même geste, et comment la maîtrise de cette gestuelle diffère entre manutentionnaires. Cette variabilité est parfois absente, car on ne s'intéresse qu'à quelques répétitions d'un même geste, ou cachée dans la façon de traiter les données, c'est-à-dire en ne considérant que les moyennes d'individus ou de groupes (Corbeil, Plamondon, Teasdale et

Handrigan, 2014; Gagnon, Delisle et Desjardins, 2002). De plus, en ce qui concerne les déterminants biomécaniques du geste, la compréhension de la manifestation des modes opératoires est souvent très segmentaire, s'intéressant la plupart du temps qu'à une seule variable dépendante à la fois, et en les combinant rarement. Par ailleurs, Srinivasan et Mathiassen (2012b) soulignent que plusieurs analyses ont été appliquées sur des résultats tirés d'expériences contrôlées effectuées en laboratoire impliquant des tâches relativement simples exécutées dans des contextes (conditions de réalisation) eux aussi simplifiés. La manutention est le résultat d'une séquence d'actions coordonnées dédiée à un déplacement de charge d'un lieu physique à un autre. Dans un contexte où l'on analyse l'activité réelle, l'isolement d'une de ces actions, par exemple l'étude du soulèvement (tâche discrète), peut dénaturer le geste en soi.

À notre avis, l'expression de la variabilité de la gestuelle d'un travailleur exposé à des tâches répétées mérite davantage d'attention.

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

La variabilité motrice est un thème qui est largement exploité par les théories du contrôle du mouvement humain. Une variation du mouvement s'opère à chaque fois que nous reproduisons le même geste, indépendamment de la qualité ou du degré de familiarisation que nous avons avec le geste lorsque nous l'exécutons. Les effets de cette variation du mouvement peuvent se répercuter sur la performance du geste (précision, rapidité, qualité désirée, etc.) et sur la santé du travailleur, ou plus précisément sur le niveau de sollicitations des structures musculosquelettiques (pouvant être caractérisé par une intensité maximale ou à un patron de chargements/cumul des chargements qui pourrait induire une fatigue ou à un abaissement du seuil de tolérance mécanique des tissus musculosquelettiques). Van Dieen, Dekkers, Groen, Toussaint et Meijer (2001) indiquent que pour une tâche de manutention répétée 360 fois, la variance inter-essai de la force de compression à L5/S1 était très importante. Par exemple, la force de compression maximale à L5/S1 (*peak*) observée parmi les 360 répétitions dépassait significativement et de façon marquée la force de compression médiane de ces essais, illustrant ainsi la très grande étendue des variations de la force de compression pour une même tâche. Gagnon et collaborateurs (2002) ont évalué la variance de trois variables de chargement : le travail mécanique, le moment résultant à L5/S1 et le moment résultant asymétrique à L5/S1 lors d'une tâche de manutention répétée à 50 reprises pour 3 conditions différentes. Les résultats ont démontré des écarts importants entre les valeurs maximales et minimales des trois variables de l'ordre de 31 %, de 27 % et de 155 % respectivement pour le travail mécanique, le moment résultant et le moment asymétrique. De plus, les variables qui expliquaient mieux ces variations étaient l'amplitude de flexion aux genoux, les moments de force et les postures asymétriques.

Deux courants théoriques tentent d'expliquer la signification de la variabilité motrice d'un geste. Un premier courant associe la variabilité motrice à un index de performance : une variabilité élevée est perçue comme un index de performance faible ou, à la limite, à un état dysfonctionnel nuisant à l'exécution des tâches. L'expertise se traduirait par le développement progressif des « habitudes de mouvement optimales » pour accomplir une tâche particulière avec un haut degré de constance d'essai en essai ou de cycle en cycle (Bartlett, Wheat et Robins, 2007; Delignières, Teulier et Nourrit, 2009; Deutsch et Newell, 2005). L'apprentissage moteur expliquerait le raffinement et l'atteinte de la constance de la reproduction du geste. Un second courant soutient que la variabilité motrice joue un rôle fonctionnel important dans l'acquisition d'habileté motrice (Bartlett *et al.*, 2007). Selon cette théorie, l'expertise ne se manifeste pas seulement dans le développement d'un patron de mouvement adéquat, mais aussi dans le développement d'une variabilité optimale pour accomplir une même finalité. La variabilité motrice assurerait que de nouvelles solutions de patron de mouvement puissent être exploitées en réponse à des changements dans l'environnement ou de fonctions physiologiques (Hamill, van Emmerik, Heiderscheit et Li, 1999; James, 2004; Riley, Santana et Turvey, 2001). La variabilité optimale d'un système biologique se situerait donc entre deux limites : au-delà d'une limite supérieure, un système est instable et sensible aux perturbations; en deçà d'une limite inférieure, le système est stéréotypé, moins susceptible de s'adapter aux changements (James, 2004; Stergiou, Harbourne et Cavanaugh, 2006).

Lémonie fait la distinction entre la variabilité motrice et la diversité motrice : « la variabilité motrice renvoie à la variabilité inhérente à la production de mouvement; la diversité motrice renvoie quant à elle à l'ensemble des modes opératoires disponibles dans la réalisation de la tâche » (2019, p. 14). Une 'grande' variabilité motrice et/ou diversité motrice serait donc un facteur protecteur dans la prévention des TMS. Madeleine et collaborateurs ont démontré l'existence d'un lien entre la douleur chronique et une diminution de la variabilité motrice d'un geste (Madeleine, Mathiassen et Arendt-Nielsen, 2008). Dans le même ordre d'idées, une fragilité fonctionnelle ou une blessure serait caractérisée par une perte de variabilité des variables fondamentales reflétant la fonction biologique (Hamill *et al.*, 2012). Toutefois, il n'y a aucun consensus actuel sur le facteur (entre la présence de douleur/blessure ou la perte de variabilité motrice) qui déclencherait cette relation (Srinivasan et Mathiassen, 2012b). Certains chercheurs proposent que la perte de variabilité lorsque associée à une perte de complexité (la réduction du nombre de degrés de liberté qui sous-tendent les actions du système) dans le temps serait à l'origine d'un TMS (Hamill *et al.*, 2012). La variabilité motrice et la diversité motrice pourraient également jouer un rôle fonctionnel pour prévenir et retarder les effets de la fatigue. Plusieurs études indiquent qu'une réorganisation du geste, caractérisée par une augmentation de la variabilité/diversité motrice aiderait à maintenir une performance optimale de la tâche durant le temps de travail, notamment en présence de fatigue (Sparto, Parnianpour, Reinsel et Simon, 1997). La relation de cause à effet entre la performance et la variabilité/diversité motrice est complexe et demeure à être validée elle aussi. Ces théories sont les fondements de certaines approches priorisées par différentes organisations du travail qui favorisent la rotation des postes de travail. L'idée centrale est d'amener de la variabilité/diversité motrice. En contrepartie, cette approche soulève quelques enjeux liés à l'apprentissage et au stress ressenti par certains travailleurs qui doivent parfois s'adapter à de nouveaux contextes de travail et de nouvelles tâches.

Des différences entre les individus sont inévitables considérant l'ensemble des facteurs anatomiques et physiologiques qui définissent nos répertoires de modes opératoires, de façons de faire ou de façons de bouger. Une récente revue de littérature a bien fait ressortir les traits individuels de la variabilité motrice lorsqu'une tâche liée au travail est effectuée à répétition (Srinivasan et Mathiassen, 2012b). Par exemple, une étude note des différences marquées entre les individus au niveau des variations des réponses électromyographiques des muscles trapèzes, de l'inclinaison de la tête et de la cinématique des membres supérieures, observées durant une tâche répétitive effectuée lors de l'assemblage d'un véhicule automobile (Mathiassen *et al.*, 2003). En fonction de la tâche, certains traits individuels, par exemple l'expertise, pourraient expliquer une partie des variations observées. Un exemple classique provient de l'étude d'Arutyunyan et collaborateurs (Arutyunyan, Gurfinkel et Mirskii, 1968) réalisé auprès de tireurs élités et novices. Ils ont observé de grandes variations cinématiques entre les essais aux articulations de l'épaule et du coude du groupe de tireurs élités seulement, alors qu'à la main tenant le pistolet, de faibles variations intra-essais leur assuraient une performance optimale aux tirs. Cette distinction entre experts et novices milite en faveur du rôle fonctionnel de la variabilité. Les experts étaient parvenus à réaliser la tâche de tir en ajustant les mouvements du reste du corps, exploitant différents mouvements fonctionnels disponibles pour satisfaire les contraintes de la tâche (principalement démontré dans les études en sciences du sport (Bartlett *et al.*, 2007)). La libération des degrés de liberté, qui surviendrait lors de l'apprentissage moteur, serait jumelée à une augmentation de la variabilité des variables de mouvements tout en gardant 'invariantes' les variables de performance. Une autre étude réalisée lors de simulations en laboratoire d'une tâche de coupe de viande a révélé que les six bouchers expérimentés avaient démontré plus de variabilité motrice (écart type) au niveau de la cinématique des bras et du dos que ceux inexpérimentés (Madeleine, Voigt et Mathiassen, 2008). Granata et collaborateurs (Granata,

Marras et Davis, 1999) ont rapporté une augmentation de la variabilité (écart type) chez des manutentionnaires expérimentés par rapport à des novices du moment de force au dos en extension et des efforts internes au niveau du dos (force de compression et en cisaillement) entre les cycles de soulèvement de caisses (tâche discrète). D'autres caractéristiques personnelles, par exemple le genre et l'avancée en âge, sont également considérées comme des déterminants de cette variabilité motrice/diversité motrice (Gaudez, Gilles et Savin, 2016; Srinivasan et Mathiassen, 2012a, 2012b).

Les comparaisons des façons de faire lors d'une tâche séquentielle en manutention ont permis de noter des caractéristiques des modes opératoires différentes entre des groupes de manutentionnaires (expert/novice, femmes/hommes, surplus de poids/poids santé), tel que le niveau de flexion du dos lors du soulèvement de caisses au sol (Corbeil, Plamondon, Teasdale, Handrigan, Ten Have et Manzerolle, 2013; Plamondon *et al.*, 2013; Plamondon, Denis, Bellefeuille, *et al.*, 2010; Plamondon, Larivière, Delisle, Denis et Gagnon, 2012; Plamondon, Larivière, Denis, St-Vincent et Delisle, 2014). Toutefois, un des constats pouvant être tirés de ces études s'appuie sur l'absence d'une « technique idéale » de manutention ou de « recettes clés en main », qui s'appliquerait pour tous (Denis, Lortie et Bruxelles, 2002). En effet, de grandes nuances dans les façons de manutentionner des charges, que l'on pourrait associer à une grande diversité motrice, ont été remarquées au sein même des différents groupes. De plus, des 'croisements' dans les façons de faire ont été notés entre les groupes de manutentionnaires. Par exemple, certains manutentionnaires novices exécutaient des façons de faire comparables à certains experts (et vice versa) et certains manutentionnaires obèses se démarquaient de leurs collègues par un chargement externe au dos équivalent à celui de manutentionnaires experts de poids santé (Corbeil, Plamondon, Teasdale et Handrigan, 2013; Corbeil *et al.*, 2014). Même dans un cadre de travail contrôlé, la variabilité et la diversité motrice de la gestuelle des manutentionnaires constituent une réalité qu'il faut considérer. Cette réalité peut avoir un très grand impact sur la performance et la santé des travailleurs.

D'autres déterminants externes du contexte du travail (facteurs occupationnels) peuvent également influencer le répertoire de modes opératoires, soit au niveau des variations intra-individuelles. Mathiassen et collaborateurs (2003) notent que la variabilité motrice chez certains des travailleurs expérimentés est influencée par le type d'outils utilisé lors d'une tâche d'assemblage. La localisation des pièces à assembler et l'emplacement des charges à soulever semblent également influencer la variabilité motrice de certains travailleurs (Granata *et al.*, 1999; Mathiassen *et al.*, 2003). Quelques chercheurs ont observé que plus la masse d'une caisse à soulever est lourde, plus la variabilité des chargements au dos entre les répétitions semble augmenter (Granata *et al.*, 1999; Mirka et Baker, 1996). Certains notent également que ni la vitesse de soulèvement de caisse (Granata *et al.*, 1999) ni le type de prise entre les mains et la charge (Mirka et Baker, 1996) semblaient avoir un impact sur la variabilité des chargements au dos.

À la lumière des connaissances actuelles sur le sujet, il apparaît nécessaire de s'intéresser à la fois à l'objectif du travailleur (réduire les chargements externes, stabiliser la caisse durant son déplacement, réaliser le travail convenablement selon ses standards ou des standards établis par l'employeur) et aux moyens pour y arriver. S'intéresser à la variabilité nous force indubitablement à sortir des sentiers battus et à porter attention aux différences individuelles. Il est important de spécifier que l'on ne cherche pas nécessairement de différence entre des groupes formés *a priori*, mais plutôt des différences entre des individus ou sous-groupes d'individus homogènes (Gagnon *et al.*, 2002) : on désire connaître par exemple ce que font les

travailleurs dont le niveau de sollicitation des structures musculosquelettiques est élevé comparativement à ceux qui font un travail identique avec un niveau moindre de sollicitations de leur corps.

Ce niveau de compréhension est important, notamment pour mieux exploiter les connaissances biomécaniques tirées des études précédentes et futures, et en faire bénéficier pleinement les milieux pratiques. Pour le praticien, ces connaissances permettront d'appuyer sur des faits valides et reproductibles le rôle de la marge de manœuvre dans la prévention des TMS. À cet effet, les résultats de ces travaux pourraient orienter les activités de prévention dans les milieux de travail, notamment au niveau de l'organisation du travail afin d'optimiser la variation des tâches et des méthodes de travail.

3. OBJECTIFS DE RECHERCHE

Les données de trois études impliquant des manutentionnaires lors des transferts de caisses du diable au convoyeur (Corbeil, Plamondon, Teasdale, Handrigan, Ten Have et Manzerolle, 2013a; Plamondon, Denis, Bellefeuille, *et al.*, 2010; Plamondon, Denis, *et al.*, 2012) font l'objet d'une nouvelle analyse qui a pour objectif d'étudier le concept de la marge de manœuvre en s'intéressant à la variabilité de la gestuelle des travailleurs et à son impact sur la sollicitation des structures impliquées dans des activités de manutention répétées.

L'étude comporte trois objectifs spécifiques :

1. Documenter les variations intra-individuelles de la signature gestuelle propre à chaque manutentionnaire (signature gestuelle) et les variations interindividuelles.
2. Comprendre la relation entre les différents modes opératoires et les chargements au dos en fonction de différents contextes.
3. Identifier, s'il y a lieu, des sous-groupes homogènes de participants définis selon le niveau de sollicitation des structures musculosquelettiques au dos et ses variations, et caractériser leurs modes opératoires prévalents et les variations connexes.

Considérant que l'organisation des gestes résulte d'une élaboration au fil des parcours de vie et des itinéraires professionnels qui sont propres à chacun des travailleurs (Chassaing, 2010), nous émettons l'hypothèse que chaque manutentionnaire aura sa propre 'signature gestuelle' lors des activités de manutention. C'est-à-dire une signature gestuelle pouvant être caractérisée par un mode opératoire dominant (s'il a le choix, si les conditions le permettent, voici ce qu'il va privilégier) ou par un coffre à outils permettant de générer un ensemble de modes opératoires sans préférence particulière. De plus, nous émettons l'hypothèse qu'une variation des modes opératoires des manutentionnaires répartirait mieux les chargements externes, d'une fois à l'autre, sur les différentes structures. Un individu qui adopterait une méthode stéréotypée dans sa façon de travailler (c'est-à-dire avec peu de variation; *repeaters*), dans ce cas-ci en soulevant ou déposant une caisse, ou qui serait contraint d'exercer son métier dans un contexte de travail peu variable, ou avec une forte contrainte temporelle, solliciterait et surutiliserait davantage les mêmes structures biologiques. À l'opposé, une personne qui présenterait des variantes dans ses méthodes de travail (*Replacers*) ou dans un contexte de travail variable et/ou sans pression temporelle répartirait les chargements, d'une fois à l'autre, sur les différentes structures impliquées. Une limitation réside dans le fait qu'une solution de mouvement peut être exécutée sans qu'elle soit totalement optimale. Nous ne nous attendons donc pas à trouver de solution unique ou de recette miracle.

Ce rapport de recherche vise une meilleure identification et compréhension de la diversité et de la variabilité des stratégies opératoires mobilisées en situation de manutention. Ces nouvelles connaissances ne conduiront pas nécessairement à l'émission de recommandations ou de propositions de solution, mais permettront de stimuler la discussion au sujet de nouvelles perspectives et pistes à suivre.

4. MÉTHODOLOGIE

4.1 Participants

Les données de trois projets expérimentaux (Corbeil, Plamondon, Teasdale, Handrigan, Ten Have et Manzerolle, 2013; Plamondon, Denis, Bellefeuille, *et al.*, 2010; Plamondon, Denis, *et al.*, 2012), comportant le même protocole expérimental, c'est-à-dire impliquant des manutentionnaires dans une tâche de transfert de quatre caisses d'un chariot à deux roues ('diable') vers un convoyeur et vice versa, ont été mises en commun pour réaliser les analyses de cette étude. Différents groupes de participants ont donc pu être étudiés : des manutentionnaires hommes (experts ou novices, ayant un poids santé ou un surplus de poids) et des manutentionnaires femmes. Au total, 65 manutentionnaires, en santé et exempt de problème musculosquelettique, ont participé à ces projets. Pour plus de détails sur les caractéristiques de ces participants, veuillez consulter les rapports de recherche associés à ces projets.

4.2 Protocole expérimental

La tâche consistait à effectuer un transfert de caisses débutant avec la caisse face au sujet et se terminant sur un diable situé à une distance de 1,5 m de la prise. La seule consigne d'exécution qui était transmise aux participants consistait à rester sur la surface de travail délimitée par une plateforme de 1,9 m sur 1,4 m pour effectuer les transferts de caisses (figure 1). Ainsi, les sujets étaient libres d'exécuter les mouvements qu'ils désiraient pour accomplir la tâche demandée, c'est-à-dire dans un contexte réaliste d'asymétrie (espace tridimensionnel), sans contrainte au niveau du mouvement de leurs pieds. La vitesse de manutention ainsi que la technique de manutention étaient libres. Les conditions expérimentales étaient réalistes en termes : (1) de difficultés que l'on rencontre sur le terrain et (2) de conditions d'exécution qui permettaient aux manutentionnaires de faire-valoir le savoir-faire acquis avec le temps.

Quatre caisses (26 cm de profondeur x 34 cm de largeur x 32 cm de hauteur) étaient déplacées sur un convoyeur positionné à la hauteur d'une palette (approximativement 15 cm du sol). Le participant devait tirer vers lui une première caisse sur le convoyeur, procéder à son transfert vers une destination sur un diable. Et ensuite, revenir vers le convoyeur pour transférer la seconde caisse sur le diable, et ainsi de suite pour les deux autres caisses. Les quatre caisses étaient empilées en hauteur sur le diable. Ces caisses avaient les caractéristiques suivantes : une caisse de 15 kg, une caisse de 15 kg contenant des bouteilles en plastique remplies à moitié de liquide (caisse fragile), une caisse de 15 kg avec un centre de masse décentré latéralement et une caisse de 23 kg pour les manutentionnaires hommes (versus 10 kg pour les manutentionnaires femmes). L'ordre de présentation des caisses était balancé afin que chacune des caisses se retrouve à deux occasions à la même position/hauteur. Deux positions du convoyeur étaient étudiées : l'une faisant face au diable (180°) à 1,5 m de distance et l'autre à 90° par rapport au diable à la même distance (1,50 m).

Chaque participant a manutentionné 128 caisses au total: quatre allers + quatre retours = huit x deux (180 ° et 90 °) x quatre caisses x deux répétitions = 128 caisses manutentionnées. L'apparition d'une fatigue musculaire était possible chez les participants. Pour contrecarrer cet effet, des mesures étaient mises de l'avant : périodes de repos de deux minutes après chaque aller-retour de 4 caisses et de 5 minutes assis à mi-séance (après 32 allers-retours). En moyenne, une séance expérimentale complète par participant durait un peu plus de 90 minutes.

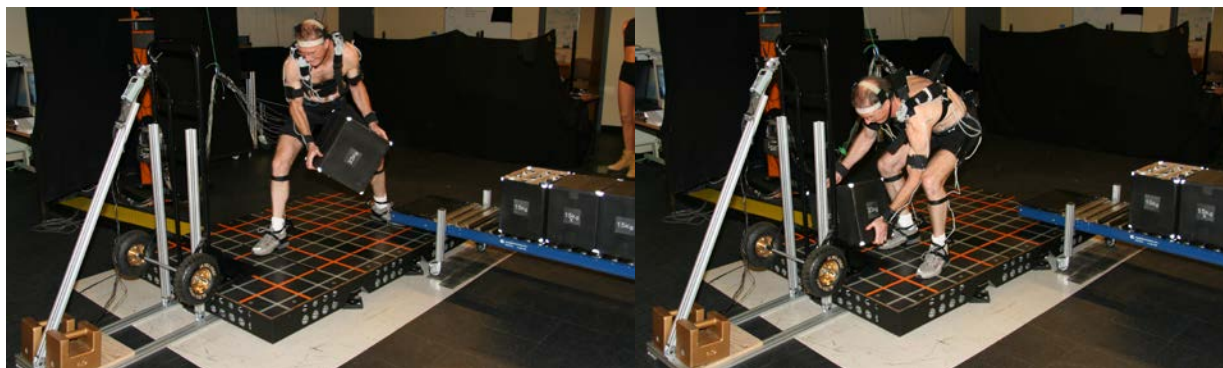


Figure 1. Montage expérimental de la tâche convoyeur à diable (configuration à 90°).

De « Impacts biomécaniques et ergonomiques de la manutention chez les travailleurs obèses », par P. Corbeil, A. Plamondon, N. Teasdale, G. Handrigan, J. Ten Have et N. Manzerolle, 2013, p. 11. ©IRSST, 2013. Reproduit avec permission.

Dans le cadre de cette étude, les activités similaires de manutention ont été regroupées. Ainsi, pour chaque condition combinant Hauteur et Aller-Retour (huit conditions au total : du convoyeur vers un des quatre emplacements sur le diable; d'un des quatre emplacements sur le diable vers le convoyeur), il a été possible de grouper 12 répétitions d'un transfert de caisse de 15 kg et quatre répétitions d'un transfert de caisse de 23 kg. Pour les conditions de 15 kg, les douze répétitions par condition incluent une certaine variabilité de déterminants, soit différentes caractéristiques de caisses et deux configurations du montage. Pour les conditions de 23 kg, les quatre répétitions par condition incluent les deux configurations du montage.

4.3 Équipement et modélisation biomécanique

Tous les détails concernant les équipements peuvent également être consultés dans les différents rapports de recherche (Corbeil, Plamondon, Teasdale, Handrigan, Ten Have et Manzerolle, 2013; Plamondon, Denis, Bellefeuille, *et al.*, 2010; Plamondon, Denis, *et al.*, 2012).

Sommairement, les forces externes aux pieds exercées lors des tâches de manutention ont été obtenues par l'intermédiaire d'une plate-forme de force élargie (1,9 x 1,4) montée sur six mini plates-formes AMTI (modèle MC3A-6-1000, Watertown Massachusetts). Deux systèmes de mesures photogrammétriques ont été utilisés pour enregistrer les coordonnées tridimensionnelles de marqueurs fixés sur la peau des principaux segments du corps et pour suivre le déplacement des boîtes. Le premier système est composé de diodes infrarouges (DEL) fixées sur le tronc et dont les signaux seront captés par quatre colonnes Optotrak (Northern Digital Inc., Waterloo, Ontario). Le second système est composé de trois caméras vidéo et servait principalement à suivre les déplacements des boîtes. Un signal synchronisé de déclenchement de collecte a été envoyé sur les différents équipements. Étant donné la différence de fréquence d'échantillonnage entre le système Optotrak et la plate-forme de force, un sous échantillonnage

a été effectué sur les données de la plateforme de force afin de pouvoir les combiner au modèle de dynamique inverse.

Les participants étaient instrumentés de manière à obtenir les mesures nécessaires à l'utilisation du modèle biomécanique segmentaire (Plamondon, Gagnon et Desjardins, 1996). Il nécessite la pose de 50 marqueurs sur 16 segments : les deux mains; les deux avant-bras; les deux bras; la tête; le tronc haut; le tronc bas; le bassin; les deux cuisses; les deux jambes; les deux pieds. La reconstruction tridimensionnelle (3D) de ces marqueurs a été réalisée à partir du système Optotrak. L'erreur de reconstruction 3D des marqueurs est inférieure à 1 mm. Les données sont par la suite intégrées dans le modèle segmentaire qui permet de calculer les paramètres cinématiques et cinétiques nécessaires au calcul des moments nets à L5/S1 (moments de flexion-extension, de flexion latérale et de torsion) (Hof, 1992). L'erreur sur l'estimation de ces moments a été estimée à moins de 10 Nm (pour de plus amples détails, le lecteur est invité à consulter l'article de (Plamondon *et al.*, 1996)).

4.4 Analyse des données

Aux fins d'analyse, chaque transfert de caisse est séparé en différentes phases d'exécution. La phase de préparation (prémanœuvre) débute au moment du premier contact de la caisse avec les mains et se termine au moment où la caisse n'est plus en contact avec aucun support, sauf les mains. La phase du placement, qui suit la phase de transition/transport (envol) de la caisse, débute lorsque la caisse entre en contact avec la surface d'appui de la destination finale et se termine lorsque les mains du manutentionnaire ne sont plus en contact avec la caisse. Les instants qui ont été analysés sont la fin de la phase de préparation (soulèvement), et le début de la phase du placement (dépôt). La durée du transfert ou de mise sous charge représente la durée de la phase de transition.

L'analyse proposée a donc porté sur une tâche séquentielle, représentée par une succession coordonnée de phase (d'actions) impliquant une phase de transition. Elle se distingue d'une analyse qui porterait sur une tâche discrète caractérisée par l'exécution d'une ou de deux phases, par exemple une phase de prise et une phase d'extension (se terminant à la suite de l'adoption d'une posture érigée neutre avec la charge dans les mains). Notez que considérant la variété des modes opératoires observés durant la phase de transition et leur influence sur la durée de cette phase, et du lien extrêmement étroit entre les phases de préparation ou du placement avec la phase de transition, qu'il s'avère très discutable de normaliser les trois phases de chaque transfert en cycle 0-100 %. Ce constat rend périlleuse l'utilisation des techniques d'analyse qui normalise l'aspect temporel des courbes cinématiques et cinétiques pour en étudier le comportement dans le temps (au risque de les déformer temporellement en les étirant ou les compressant pour les comparer aux autres).

La présente recherche s'est restreinte à l'étude de variables discrètes dans l'analyse du mouvement humain. Pour chacune des huit conditions de 15 kg réalisées par chaque participant (n=65), 12 répétitions ont été groupées ensemble pour en extraire une moyenne et un écart type. Une répétition englobe l'ensemble de la tâche, soit du soulèvement d'une caisse jusqu'à son dépôt. Ces paramètres statistiques ont également été extraits pour les huit conditions de 23 kg (4 répétitions seulement par condition) réalisées par les manutentionnaires hommes seulement (n=50).

4.4.1 Variables dépendantes

Deux types de variables dépendantes ont été analysées pour répondre aux objectifs de cette étude : variables décrivant certains aspects du geste (durée et cinématique du mouvement), et variables associées aux sollicitations mécaniques du geste. Ces variables sont clarifiées ci-dessous. Suivra une section pour décrire la signature gestuelle, soit une proposition de regroupements des variables permettant la catégorisation des modes opératoires du geste de chaque participant

Variables descriptives du geste

Plusieurs variables ont été retenues pour décrire la variabilité du geste en fonction du contexte et des groupes de participants. Le bras de résistance (distance entre la position des mains et l'articulation sacro-lombaire), l'inclinaison du dos (flexion du tronc à C7 par rapport à la verticale), l'angle de torsion lombaire et l'angle de flexion des genoux (défini d'après la définition de Grood et Suntay, 1983). Le déplacement des pieds a été quantifié en fonction de quatre variables : l'espacement médio-latéral et l'espacement antéro-postérieur entre les pieds, l'orientation du pied ipsilatéral projetée dans le plan horizontal et référencée par rapport à l'axe sagittal du corps (du côté de la rotation du corps) et l'orientation du pied contralatéral. L'asymétrie de charge évaluée par une distance asymétrique de la charge par rapport au corps, et la coordination entre l'angle au genou (de la jambe la plus près de la charge manipulée) et l'inclinaison du dos ont également été évaluées au soulèvement et au dépôt de la charge. Le rapprochement maximal de la caisse dans le plan horizontal a été évalué durant la phase de préparation (prémanceuvre). D'autres variables ont été choisies pour caractériser la phase de transition : la durée du transfert (en mise sous charge), la vitesse maximale résultante atteinte par la caisse, le pourcentage de temps durant la phase de transition où la charge est à proximité du corps, le ratio de la secousse minimale (« *jerk* ») et la distance parcourue verticale de la caisse. Plusieurs de ces variables seront définies à la sous-section 4.4.2 portant sur la signature gestuelle (tableau 1).

Variables décrivant la sollicitation mécanique

Les moments nets à l'articulation L5/S1 ont été estimés à l'aide d'un modèle biomécanique segmentaire (Plamondon *et al.*, 1996). Les valeurs de moment de force à L5/S1 en sagittal et de moment de force résultant à L5/S1 en asymétrie (équivalent à la racine carrée de la somme des carrés des moments de force à L5/S1 selon l'axe longitudinal et l'axe sagittal) ont été extraites aux instants du soulèvement et du dépôt. Notez que ces valeurs ne représentent pas les chargements lombaires résultants maximaux, mais plutôt les valeurs observées aux instants clés du transfert de caisse. Bien que ces valeurs soient fortement proportionnelles entre elles, elles se distinguent par l'occurrence du moment résultant maximal durant le premier 50 % de la phase de transition qui survient en moyenne entre 1 et 6 % (l'instant du soulèvement équivaut à 0 %) et par l'occurrence du moment résultant maximal durant le dernier 50 % de la phase de transfert qui

survient entre 86 et 97 % (l'instant du dépôt équivaut à 100 %) (Plamondon, Denis, Bellefeuille, *et al.*, 2010; Plamondon, Denis, *et al.*, 2012).

L'impulsion angulaire à L5/S1 en sagittal a été estimée en calculant l'aire sous la courbe du moment de force à L5/S1 en sagittal. L'impulsion angulaire à L5/S1 asymétrique a aussi été calculée.

Étant donné que l'anthropométrie des participants a une influence significative dans le calcul des moments de force à L5/S1, une procédure de normalisation des données a été effectuée. Celle-ci consistait à diviser les moments de force et les impulsions angulaires par le moment exercé à L5/S1 du poids du tronc à l'horizontale (Plamondon, Denis, Bellefeuille, *et al.*, 2010). Ainsi, ces moments de force normalisés sont exprimés en unité du poids du tronc et les impulsions angulaires en unité du poids du tronc seconde. La sollicitation mécanique inclut donc un aperçu du niveau de sollicitation aux instants du soulèvement et du dépôt, ainsi que la notion de cumul des chargements lombaires.

4.4.2 Signature gestuelle (ou variables liées aux modes opératoires)

La locution 'signature gestuelle' sous-entend une caractérisation des profils cinématiques de chaque manutentionnaire. Elle contient donc la description des façons de se positionner, de bouger et de déplacer chaque caisse (modes opératoires). Alors que le mode opératoire permet une description d'une façon de faire particulière pour réaliser une tâche (St-Vincent *et al.*, 2014), la signature gestuelle correspond à la manière de gérer un coffre à outils, composé de règles d'action ou de structures opératoires, qui permet à l'individu de recomposer ses modes opératoires en fonction de ses préférences et du contexte de travail. Certains individus peuvent avoir une seule préférence, c'est-à-dire un mode opératoire dominant, d'autres peuvent privilégier plusieurs façons de faire. La signature gestuelle est donc propre à chaque individu et varie en fonction du contexte.

La signature gestuelle est décrite en fonction de paramètres tirés des principales phases du mouvement de la manutention : soit la préparation (prémanceuvre), la transition et le placement. Les instants de soulèvement et de dépôt ont également été considérés. L'objectif de créer une signature est de choisir un minimum de paramètres qui permet de catégoriser les principaux modes opératoires et ainsi décrire le geste (et son exposition au risque), et exprimer la variabilité du geste moteur de chaque manutentionnaire d'une manière concrète et simplifiée (tableau 1).

Tableau 1. Descriptions des paramètres de la signature gestuelle

Paramètre	Description	Phase ou instant
Prémanceuvre	Classification selon le rapprochement de la caisse et le bras de résistance avant le soulèvement	Phase de préparation
Position Pieds – Soulèvement	Classification de la position des pieds	Soulèvement
Posture Corps – Soulèvement	Classification de la position du corps en fonction de la relation entre l'angle au genou et l'inclinaison du dos	Soulèvement
Asymétrie – Soulèvement	Classification selon l'asymétrie liée au positionnement de la charge par rapport au corps et la posture du dos en rotation axiale (relation pieds-corps-mains)	Soulèvement
Coordination – Soulèvement	Type de coordination entre le dos et les genoux	Début de la transition
Proximité corps-caisse	Classification selon le pourcentage de temps que les mains demeurent près du corps	Phase de transition
Transition	Classification selon fluidité du geste et travail mécanique effectué sur la caisse	Phase de transition
Position Pieds – Dépôt	Classification de la position des pieds	Dépôt
Posture Corps – Dépôt	Classification de la position du corps en fonction de la relation entre l'angle au genou et l'inclinaison du dos	Dépôt
Asymétrie – Dépôt	Classification selon l'asymétrie liée au positionnement de la charge par rapport au corps et la posture du dos en rotation axiale (relation pieds-corps-mains)	Dépôt
Coordination – Dépôt	Type de coordination entre le dos et les genoux	Fin de la transition

Les prémanceuvres ont été étudiées entre l'instant du contact des mains sur la caisse et l'instant du soulèvement de la caisse (phase de préparation). La quantification du déplacement de la caisse dans le plan horizontal est définie en considérant la position virtuelle du centroïde des deux poignets par rapport à l'articulation L5/S1 du manutentionnaire (bras de résistance). La variable 'rapprochement de la caisse' a été calculée en soustrayant la distance planaire entre l'emplacement de ce centroïde à l'instant du contact et la distance minimale du centroïde durant cette phase. La première valeur de référence a été établie à 13 cm; soit équivalente à la moitié de la profondeur de la caisse ($26 \div 2 = 13$ cm). Au terme de la phase de préparation, soit au

soulèvement, la distance des poignets par rapport à l'articulation L5/S1, 'Bras de résistance – Soulèvement', est comparée à une valeur de référence établie à 38 cm; soit une valeur équivalente à la moitié de la profondeur de la caisse ($26 \div 2 = 13$ cm) additionnée de 25 cm; équation pour estimer le bras de levier (« *Horizontal Location* ») lorsque la hauteur de soulèvement verticale est inférieure à 25 cm du sol, tirée de la version révisée de l'équation de soulèvement du NIOSH (Waters , Putz-Anderson et Garg, 1994).

La classification des mouvements liés à la prémanœuvre est divisée en quatre catégories :

1. Mouvement induisant un rapprochement de la caisse sur une distance supérieure ou égale à 13 cm et un bras de résistance inférieur ou égale à 38 cm.
2. Mouvement de rapprochement de la caisse sur une distance supérieure ou égale à 13 cm et un bras de résistance au soulèvement supérieure à 38 cm.
3. Peu de rapprochement de la caisse, soit une distance inférieure à 13 cm et un bras de résistance inférieur au soulèvement ou égale à 38 cm. Cette catégorie regrouperait les situations où il y a peu de mouvement de la caisse durant la phase de prémanœuvre, mais que le bras de levier reste court à cause notamment d'un meilleur positionnement du participant à proximité de la caisse.
4. Peu de rapprochement de la caisse, soit une distance inférieure à 13 cm et un bras de résistance au soulèvement supérieure à 38 cm.

Les conditions initiales au soulèvement sont caractérisées par trois paramètres : la position des pieds, la posture du corps dans le plan sagittal et la relation entre les pieds, le corps et les mains. D'abord, la classification des positions des pieds au soulèvement se base sur la méthode de Muller et collaborateurs (Muller *et al.*, 2019) et se définit en quatre catégories :

1. Les deux pieds font face à la caisse soulevée ('Pieds devant').
2. Un pied devant l'autre; le pied arrière est du côté ipsilatéral à la rotation du corps ('Pied ipsi arrière').
3. Un pied devant l'autre ('Pied contra arrière').
4. 'Pieds parallèles'; facilitant la transition vers le lieu de dépôt, car ils pointent à mi-chemin entre le lieu de soulèvement et de dépôt.

La méthode de Muller et collaborateurs (Muller *et al.*, 2019) nécessite en entrée quatre variables : l'orientation du pied ipsilatéral à la rotation du corps, l'orientation du pied contralatéral à la rotation du corps, la distance entre les pieds dans la direction médio-latérale (X) et dans la direction antéro-postérieure (Y).

Puis, il y a la posture du corps en documentant celui-ci dans le plan sagittal soit avec l'angle articulaire au genou (la jambe la plus près du lieu de soulèvement) et l'inclinaison du dos (angle segmentaire du dos par rapport à la verticale). La classification de la position du corps dans le plan sagittal se définit aussi en quatre catégories :

1. Posture neutre ('Neutre').
2. 'Stoop'.
3. 'Demi-squat' (équivalent au « *Deadlift* »).
4. 'Squat'.

La description détaillée de la méthode inspirée des travaux de Burgess-Limerick et Abernethy, 1997; Straker, 2003 se trouve en Annexe A. La catégorie 'Demi-squat' est possiblement la moins répandue bien que bien documentée dans la littérature scientifique (Burgess-Limerick et Abernethy, 1997; Burgess-Limerick, Abernethy, Neal et Kippers, 1995; Gagnon, Plamondon, Gravel et Lortie, 1996; Straker, 2003).

Le patron de mouvement nécessaire pour soulever une caisse a été défini en fonction du type de coordination que l'on observe au niveau de l'extension du dos et des genoux. La méthode choisie (« *Relative coordination metric* ») a initialement été développée pour étudier la coordination pluri articulaire liée à des mouvements non cycliques du membre supérieur (Fineman et Stirling, 2017). La coordination est évaluée en fonction du rapport des profils de vitesse normalisée ($\rho_{12}(t)$) de deux segments/articulations (équation 1) : la dérivée dans le temps de l'angle articulaire au genou (ω_1) et la dérivée dans le temps de l'inclinaison du dos par rapport à la verticale (ω_2).

$$\rho_{12}(t) = 2 \tan^{-1} \left(\frac{\omega_1(t) / \max(\omega_1(t))}{\omega_2(t) / \max(\omega_2(t))} \right) - 90^\circ \quad (1)$$

Lorsque la valeur absolue du rapport des profils de vitesse normalisée ($|\rho_{12}(t)|$) est inférieure à 20° , cela correspond aux mouvements avec une coordination relative élevée (c'est-à-dire qu'aucun des segments/articulations n'est dominant dans le patron de mouvement). Lorsque $\rho_{12}(t) < -20^\circ$, le patron de mouvement est moins coordonné et dominé principalement par les mouvements du segment/articulation 2 (inclinaison du dos); alors que lorsque $\rho_{12}(t) > 20^\circ$, le patron de mouvement est aussi moins coordonné et dominé par les mouvements du segment/articulation 1 (angle au genou).

Trois catégories ont été définies pour définir le mode de coordination au soulèvement :

1. Coordination synchronisée : lorsque la valeur $|\rho_{12}(t)|$ est inférieure ou égale à 20° plus de 40 % du temps de soulèvement (du moment de la prise jusqu'à la fin de l'extension du genou et du dos).
2. Coordination séquentielle : lorsque la valeur $|\rho_{12}(t)|$ est supérieure à 20° plus de 60 % du temps de soulèvement (du moment de la prise jusqu'à la fin de l'extension du genou et du dos).

3. Absence de séquence coordonnée entre l'angle articulaire du genou et l'inclinaison du dos, dû à une transition avec peu de variations des angles selon des critères liés à la durée et à la hauteur maximale atteinte par la caisse.

La relation pieds, corps et mains est également définie en quatre catégories selon la différence de rotation axiale dans le plan transverse du référentiel global des épaules par rapport aux hanches, et la position du centroïde des poignets dans le plan transverse par rapport aux hanches (référéncée aux droites passant par les hanches et perpendiculaires au segment liant celles-ci). Quatre catégories ont été définies pour définir l'asymétrie au soulèvement :

1. Neutre : Rotation axiale de moins de 15 degrés, avec le centroïde des mains positionnées entre les hanches (c'est-à-dire, entre les droites perpendiculaires passant par les hanches et perpendiculaires au segment liant celles-ci).
2. 'Asymétrie de posture' (en torsion) marquée (effort asymétrique en torsion sans asymétrie de posture latérale) : Rotation axiale de plus de 15 degrés, avec le centroïde des mains positionnées entre les hanches.
3. 'Asymétrie de charge' marquée (effort asymétrique latéral principalement lié au positionnement de la charge, sans asymétrie de posture en torsion) : Rotation axiale de moins de 15 degrés, avec le centroïde des mains positionnées au-delà des hanches (c'est-à-dire du côté gauche de la droite perpendiculaire passant par la hanche gauche ou du côté droit de la droite perpendiculaire passant par la hanche droite).
4. 'Asymétrie combinée' (effort asymétrique marqué en latéral et en rotation) : Rotation axiale de plus de 15 degrés, avec les mains excentrées au corps (tel que défini précédemment).

Une fois soulevée, la caisse peut se déplacer relativement au corps durant la transition, faisant ainsi varier les efforts asymétriques (Proximité corps-caisse). Trois catégories ont été définies en fonction du pourcentage de temps de la durée du transfert (moment entre la prise et le dépôt de la caisse), c'est-à-dire où le centroïde des mains demeure ou pas à l'intérieur d'un rayon de 33 cm (20 cm + la moitié de la profondeur de la caisse, en référence à l'équation pour estimer le bras de levier (« *Horizontal Location* ») lorsque la hauteur de soulèvement verticale est supérieure ou égale à 25 cm du sol, tirée de la version révisée de l'équation de soulèvement du NIOSH (Waters, Putz-Anderson, Garg et Fine, 1993) par rapport à l'articulation L5/S1 :

1. La distance entre le centroïde des mains et l'articulation L5/S1 est inférieure ou égale à 33 cm au moins le 2/3 du temps entre le soulèvement et le dépôt.
2. La distance entre le centroïde des mains et l'articulation L5/S1 est inférieure ou égale à 33 cm durant une période qui varie entre le 1/3 et le 2/3 du temps entre le soulèvement et le dépôt.
3. La distance entre le centroïde des mains et l'articulation L5/S1 se trouve à l'extérieur d'un rayon de 33 cm plus du 2/3 du temps entre le soulèvement et le dépôt de la caisse.

La transition a aussi été caractérisée par un autre paramètre de la signature (Fluidité et travail mécanique) défini par deux variables. La première variable retenue est inspirée du « *dimensionless-squared-jerk xyz measure* » (Hogan et Sternad, 2009). Il s'agit d'une mesure de secousse minimale adimensionnelle de la caisse liée aux trois plans de mouvement indépendante de la vitesse et de la durée du mouvement (Hogan et Sternad, 2009). Il s'agit en quelque sorte de calculer l'intégrale de la résultante tridimensionnelle du jerk de la trajectoire du centroïde des mains. La racine carrée est appliquée sur le résultat final afin de réduire la dimension finale de la mesure. Une valeur ratio est calculée en fonction d'une mesure similaire associée à une trajectoire de la caisse respectant le principe du « *minimum jerk* » (Amirabdollahian, Loureiro et Harwin, 2002; Kyriakopoulos, 1994). Le ratio est nécessairement supérieur à 1, et plus il est élevé, plus que la somme des secousses liées au déplacement de la caisse s'écarte de celle liée à une trajectoire optimale. La seconde variable retenue est la vitesse moyenne verticale (VM_z) de la caisse normalisée par la vitesse moyenne verticale de la trajectoire optimisée selon le principe de secousse minimale (« *minimum jerk* »).

$$\frac{VM_z}{VM_{z \text{ min jerk}}} = \frac{DP_z / \text{Durée}}{DP_z \text{ min jerk} / \text{Durée}} = \frac{DP_z}{DP_z \text{ min jerk}} = \frac{DP_z}{|h_z f - h_z i|} \quad (2)$$

En quelque sorte, il s'agit d'une mesure équivalente au ratio de la distance parcourue de la caisse selon l'axe vertical (DP_z) par rapport à la différence de hauteur (h_z) des caisses entre la prise et le dépôt (équation 2). La valeur absolue du ratio est majoritairement supérieure à 1 (sauf si la caisse suit une trajectoire directe du lieu de prise au lieu de dépôt et qu'elle est relâchée avant d'être en appui), et plus il est élevé, plus il y a un travail qui doit être fait contre la gravité. Il y a un risque que la valeur du ratio tende vers l'infini lorsque le dénominateur tend vers 0 (c'est-à-dire lorsque la hauteur de la caisse à la prise et au dépôt est la même). En ce qui concerne cette étude, ce ne sera pas le cas puisque le dénominateur varie entre 0,15 et 0,81 m. La réduction de la distance parcourue de la caisse a été associée à une réduction du travail mécanique net associé et à une économie de l'énergie (Delisle, Gagnon et Desjardins, 1996).

Puisque ces deux dernières mesures sont adimensionnelles, elles sont par défaut indépendantes des autres facteurs, incluant la durée du transfert. Toutefois, l'association entre ces mesures adimensionnelles et la durée du transfert (entre le moment de la prise et le dépôt) semble demeurer présente (tableau 2).

Tableau 2. Coefficients de corrélation entre les variables choisies pour caractériser le paramètre Fluidité et travail mécanique de la signature gestuelle et aussi la durée du transfert.

	Ratio du jerk	Ratio vitesse moyenne
Ratio vitesse moyenne	0,39	
Durée du transfert	0,68	0,28

Quatre catégories ont été définies en fonction des valeurs médianes de ces deux mesures pour l'ensemble des essais des huit conditions impliquant une masse de 15 kg. La valeur médiane du ratio du **jerk** est de 2,66, et celle du ratio de la **vitesse moyenne verticale** est de 8,26.

1. La transition est optimale lorsque les ratios sont inférieurs ou égaux aux valeurs médianes;

2. La transition est fluide seulement lorsque le ratio du jerk est inférieur ou égal à la valeur médiane, et que le ratio de la vitesse moyenne verticale est supérieur à la valeur médiane;
3. La transition est économique seulement (en référence au travail exercé sur la caisse selon l'axe vertical) lorsque le ratio du jerk est supérieur à la valeur médiane, et que le ratio de la vitesse moyenne verticale est inférieur ou égal à la valeur médiane;
4. La transition est moins fluide et coûteuse lorsque les ratios sont supérieurs aux valeurs médianes.

Enfin, en ce qui concerne le moment du dépôt, les conditions de réalisation ont été analysées de la même façon qu'au moment du soulèvement :

- la position des pieds au moment du dépôt .
- la position du corps selon l'angle articulaire au genou (de la jambe la plus près du lieu de dépôt) et l'inclinaison du dos.
- la relation pieds, corps et mains (asymétrie).
- le type de coordination que l'on observe entre l'inclinaison du dos et l'angle au genou (de la jambe la plus près du lieu de dépôt).

Bien que les post-manœuvres n'ont pas été considérées, ils peuvent constituer un geste nécessaire pour assurer le bon positionnement de la caisse sur le lieu de dépôt. Au total, la signature gestuelle du manutentionnaire est définie par 11 paramètres (regroupant un total de 39 catégories) : 1 paramètre lié à la prémanœuvre, 4 paramètres liés à la prise, 2 paramètres liés à la transition et 4 paramètres liés au dépôt. L'expression de la variabilité des modes opératoires du geste moteur de chaque manutentionnaire a été documentée en calculant le pourcentage des essais répétés d'une même condition que l'on observe dans chacune des catégories prédéfinies de la signature.

Un indice de dispersion (D) a aussi été calculé à l'aide de l'équation 3. L'indice de dispersion est un indicateur de la constance des modes opératoires de la signature gestuelle d'un participant. Un indice de dispersion est calculé pour chaque paramètre de la signature gestuelle. L'indice de dispersion tend vers un 1 lorsqu'un participant, d'un essai à un autre, exécute le même mode opératoire (une même catégorie de la signature (C)) dans une condition expérimentale donnée, et se rapproche de n (le nombre de catégories du paramètre) lorsqu'il exécute, d'une fois à l'autre, un mode opératoire différent d'un paramètre de la signature gestuelle.

$$D = \frac{1}{\sum_{i=1}^n C_i^2} = \frac{1}{(C_1^2 + C_2^2 + C_3^2 \dots + C_n^2)} \quad (3)$$

4.5 Analyses des données

Globalement, les analyses qui ont été effectuées sur les données sont issues de trois expériences et d'un protocole expérimental commun. Au total, 65 individus ont été testés et plus de 8320 caisses ont été déplacées d'un convoyeur à un diable ou vice versa. La tâche demandée est considérée comme séquentielle, imbriquant une série d'actions successives nécessitant quatre soulèvements, une caisse à la fois, leurs déplacements transitoires et leurs dépôts. L'environnement dans lequel œuvraient les participants contenait peu de contraintes : les participants étaient libres de bouger les caisses de la manière désirée et libres de se déplacer à l'intérieur d'une surface de 2,66 m² (amplement suffisant pour accomplir la tâche demandée) sans obstacle au sol.

Les variables dépendantes liées à la variabilité concernent exclusivement le mouvement, la performance motrice (p. ex. durée du transfert) et les chargements biomécaniques à L5/S1 (figure 2). Pour les variables dépendantes à l'instant du soulèvement, les analyses statistiques ont été dirigées exclusivement sur la tâche du diable au convoyeur (le retour), afin de faire ressortir l'effet des différentes hauteurs (notez que pour la tâche aller, toutes les caisses sont soulevées à partir du convoyeur). Pour celles à l'instant du dépôt, les analyses statistiques ont porté sur la tâche du convoyeur au diable (l'aller). Cela a été fait afin d'alléger considérablement les données analysées.

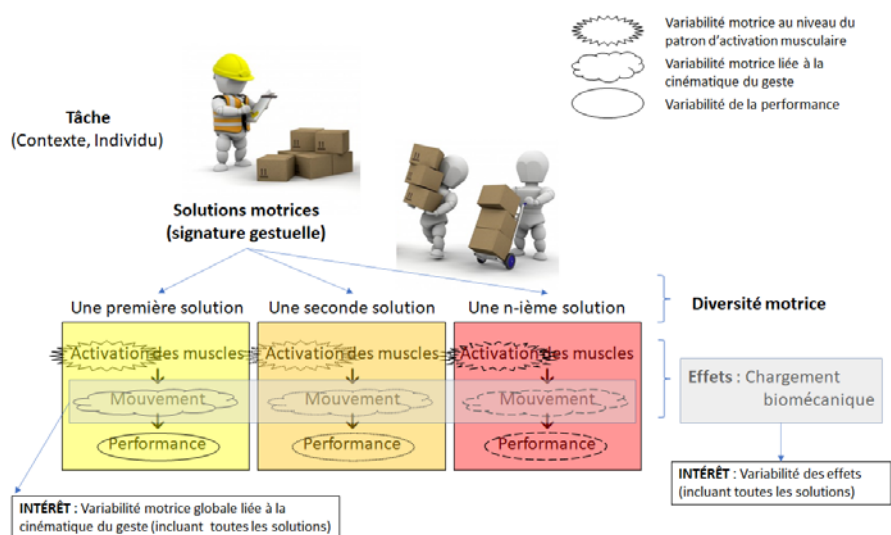


Figure 2. La variabilité motrice s'exprime à différents niveaux dans l'exécution d'un geste effectué par un individu.

Note : La variabilité peut être analysée au niveau de la performance du geste (p. ex. : le temps d'exécution, la précision spatiale du geste ou la force externe à produire). Elle peut l'être également au travers de variables cinématiques et cinétiques du patron de mouvement pour une même articulation ou entre différentes articulations (coordination), et au niveau de l'activité musculaire et des patrons de recrutement musculaire.

Les différentes analyses proposées ont été réparties dans trois parties. D'abord au chapitre 5 (première partie), les variations intra- et interindividuelles (en fonction des groupes formés *a priori*) ont été analysées et documentées dans des tableaux de référence. Ensuite, au chapitre 6, les modes opératoires les plus fréquents et leurs variations en fonction du contexte de travail ont été documentés, et leurs coûts musculosquelettiques évalués par les chargements au dos ont été évalués et comparés. Puis au chapitre 7, une démarche est proposée pour identifier des sous-groupes homogènes (p. ex. *Repeaters* versus *Replacers*) au niveau de la sollicitation des structures musculosquelettiques au dos et ses variations, et d'établir par la suite ce qui les distinguait au niveau de leurs modes opératoires et les variations connexes. Le chapitre 7 propose donc une autre façon d'analyser les variations interindividuelles de sous-groupes formés *a posteriori*. La stabilité des traits individuels est analysée et discutée.

Rappelons que l'étude comportait trois objectifs spécifiques :

- Documenter les variations intra-individuelles de la signature propre à chaque manutentionnaire (signature gestuelle) : chapitre 5.
- Documenter les variations interindividuelles des modes opératoires en fonction des chargements au dos : chapitres 5 et 7.
- Évaluer la stabilité des traits individuels liés à la variabilité des modes opératoires en fonction de différents contextes : chapitres 6 et 7.

Enfin, au chapitre 8, on y trouve une discussion générale qui jette un regard analytique sur le concept de marge de manœuvre. Considérant que chacun des manutentionnaires disposait de toute la marge de manœuvre voulue étant donné l'absence de contrainte (ou presque) lors de la manutention, la question d'intérêt concerne si les manutentionnaires ont exploité cette marge de manœuvre à sa pleine capacité. Si oui, en ont-ils bénéficié via une meilleure répartition des chargements externes et/ou d'un cumul total minimal de ces chargements? Un retour sur l'ensemble des résultats a été réalisé afin de valider ce concept en testant le lien entre cette liberté (pouvant être exprimée par un potentiel de variabilité) et le risque de développer des TMS. Cet objectif sera répondu par des réflexions analytiques formulées par des spécialistes en ergonomie, en biomécanique et en contrôle de la motricité.

5. PREMIÈRE PARTIE – LES VARIATIONS INTRA- ET INTERINDIVIDUELLES : EFFETS DU CONTEXTE

5.1 Introduction

L'objectif de cette première partie de l'analyse est de quantifier les variations intra- et interindividuelles et créer des tableaux de référence. Ces variations intra-individuelles seront ensuite comparées en fonction de la hauteur de soulèvement sur le diable ou de dépôt sur le diable (effet Hauteur), et pour les participants hommes seulement, en fonction de la masse de la charge (effet Masse). Des comparaisons entre groupes seront effectuées afin de déterminer l'effet Genre/Sexe, l'effet Surplus de poids et l'effet Expertise et ses interactions avec les conditions répétées par les sujets.

5.2 Méthodologie

L'ensemble des détails méthodologiques est décrit dans le chapitre précédent. On trouve dans cette section les détails qui sont propres à l'analyse statistique utilisée pour tester l'hypothèse nulle postulant l'égalité entre des paramètres statistiques des différents échantillons.

5.2.1 Analyse statistique

À la suite d'une première analyse exploratoire des données, il a été observé que la normalité de la distribution des moyennes n'était pas assurée pour l'ensemble des variables dépendantes. La distribution des données s'apparente davantage à une distribution Gamma où la fréquence d'observations croît rapidement pour les faibles valeurs et décroît à un taux plus faible au fur et à mesure que les valeurs sont plus élevées. Cette distribution convient aux variables avec des valeurs d'échelle positives arrondies à des valeurs positives supérieures. La procédure des équations d'estimation généralisées (EEG), qui étend le modèle linéaire généralisé pour permettre l'analyse des mesures répétées, a été réalisée pour effectuer les comparaisons des conditions. Notez que la taille d'effet ne peut être calculée pour ce type d'analyse.

Les paramètres utilisés étaient les suivants :

- Le type de modèle utilisé intègre une fonction de distribution Gamma et un lien log;
- L'analyse principale est réalisée sur plus de 60 participants, et il n'y avait pas de données manquantes;
- La matrice de corrélation de travail possède une structure indépendante;
- Les autres paramètres sont choisis par défaut.

Critères observés :

- Qualité de l'ajustement, quasi-vraisemblance sous un critère de modèle d'indépendance;
- La valeur p comparée au niveau de signification établie à 0,05. Les résultats dont le niveau de signification était inférieur à 0,10 ont aussi été notés;

- Lorsque significatif, des analyses de contraste ont été réalisées sur la différence des moyennes avec un ajustement pour les comparaisons multiples (différence la moins significative).

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel IBM SPSS statistics (version 26, IBM ©).

5.3 Résultats

Considérant la quantité d'information qui est présentée dans cette section, les résultats portant sur les variations intra-individuelles (sous-section 5.3.1) et les variations interindividuelles (sous-section 5.3.2) ont été bonifiés d'une discussion spécifique aux principaux effets rapportés.

5.3.1 Variations intra-individuelles

Posture du corps et angles

La posture du corps ou l'attitude posturale générale adoptée par les participants varie en fonction de la hauteur de soulèvement ou de dépôt des caisses. Pour les caisses au sol (H1), la posture dominante est le demi-squat au dépôt (61 % des essais) et au soulèvement (70 %) (tableau 3). Pour la hauteur intermédiaire basse (H2), le demi-squat est la posture qui domine pour la majorité des essais au soulèvement (71 %), alors que le 'Stoop' est la posture la plus prévalente au dépôt (49 %).

On observe un effet Hauteur ($p < 0.01$), mais pas d'effet Masse ($p > 0,13$), sur les variations inter-essais de l'angle au genou et de l'inclinaison du dos (tableau 4). Plus la caisse est près du sol, plus on observe de variations inter-essais de l'angle au genou et de l'inclinaison du dos au moment du soulèvement ou du dépôt ($p < 0,01$) : les variations inter-essais pour la condition au sol sont de deux à trois fois supérieures à celles observées pour le soulèvement ou le dépôt de caisse à une hauteur haute (H4). L'écart moyen calculé pour tous les participants entre leurs essais extrêmes (min et max) de l'angle au genou au moment du soulèvement au sol était de 40 degrés (écart moyen de 48 degrés pour le dépôt au sol), comparativement à un écart de 24 degrés pour l'inclinaison du dos (écart moyen de 21 degrés pour le dépôt au sol). Les écarts moyens observés dans nos études sont comparables à ceux rapportés dans Gagnon et collaborateurs (2002) entre le meilleur essai et le pire essai (auprès de 10 participants novices) selon un des critères de l'étude (travail mécanique total, moment de force résultant ou asymétrique à L5/S1) : écart au niveau de l'angle de flexion au genou gauche de 40 degrés et de l'inclinaison du dos de 12 degrés.

Tableau 3. Sommaire des statistiques descriptives des variables liées à la posture du corps, à la coordination inter segmentaire du genou et du dos (plan sagittal) et à l'asymétrie du dos au moment du soulèvement des caisses du diable et du dépôt des caisses sur le diable.

Les cases en jaune renseignent sur les catégories les plus fréquentes et l'indice de dispersion des paramètres de la signature (Posture du corps, Coordination et Asymétrie) en fonction des différentes conditions expérimentales.

Variables	Dépôt (vers une des quatre H du diable)				Soulèvement (une des quatre H du diable)			
	H1	H2	H3	H4	H1	H2	H3	H4
<i>Inclinaison du dos (°)</i>								
Moyenne	78.7	66.9	35.0	12.6	77.0	65.9	38.0	16.1
Étendue de la variation (max-min)	21	17	18	13	24	23	18	13
Écart type	±6.6	±5.2	±5.5	±4.2	±7.1	±7.0	±5.5	±4.0
<i>Angle de flexion au genou (°)</i>								
Moyenne	71.8	35.7	20.3	17.4	85.1	59.1	36.6	27.6
Étendue de la variation (max-min)	48	37	18	14	40	39	26	17
Écart type	±15.1	±11.4	±5.4	±4.4	±12.7	±12.1	±7.8	±5.2
Signature – Posture du corps								
Catégorie la plus fréquente	Demi-Squat	Stoop	Demi-Squat	Neutre	Demi-Squat	Demi-Squat	Demi-Squat	Demi-Squat
Fréquence	61%	49%	58%	58%	70%	71%	83%	45%
Indice de dispersion	1.33	1.46	1.63	1.83	1.29	1.32	1.27	1.68
<i>Coordination synchronisée (%)*</i>								
Moyenne	33.8	34.6	28.3	30.3	31.5	35.6	34.1	34.8
Étendue de la variation (max-min)	56	62	59	59	54	59	65	67
Écart type	±16.9	±19.4	±18.7	±19.4	±16.7	±18.5	±20.2	±22.3
Signature – Coordination								
Catégorie la plus fréquente	Séq. Genou	Séq. Dos	Séq. Dos	Séq. Genou	Séq. Genou	Séq. -	Séq. Dos	Séq. -
Fréquence	67%	65%	70%	63%	71%	64%	62%	53%
Indice de dispersion	1.60	1.76	1.70	1.96	1.53	1.67	1.87	2.24
<i>Torsion (°)</i>								
Moyenne	-4.3	-6.0	-8.1	-4.9	-3.7	-7.0	-11.7	-14.2
Étendue de la variation (max-min)	19	26	29	22	19	20	23	22
Écart type	±6.1	±8.3	±9.0	±6.8	±5.7	±6.2	±7.2	±6.6
<i>Distance asymétrique (cm)</i>								
Moyenne	3.7	5.5	6.9	3.5	4.3	9.1	11.6	11.4
Étendue de la variation (max-min)	14	21	25	20	16	16	19	18
Écart type	±4.4	±6.4	±8.0	±6.4	±4.8	±4.8	±5.8	±5.4
Signature – Asymétrie								
Catégorie la plus fréquente	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	x2	x2
Fréquence	75%	60%	51%	66%	71%	54%	40%	46%
Indice de dispersion	1.38	1.72	2.05	1.75	1.39	1.69	1.82	1.96

H = hauteur (H1 = au sol; H2 = hauteur intermédiaire basse; H3 = hauteur intermédiaire haute; H4 = hauteur haute); ° = dimension exprimée en degrés; *Le pourcentage indique un pourcentage du temps de soulèvement/dépôt où la vitesse angulaire au genou et celle au dos varient en synchronie; Étendue de la variation est calculée en fonction de la différence entre les valeurs minimales et maximales observées par participant, et, ensuite, en faisant la moyenne des 65 participants; l'écart type des 12 essais pour chaque condition représente la variabilité intra-individuelle; Séqu. = séquentielle (Séqu + articulation fait référence à un mode moins coordonné et dominé principalement par l'articulation indiquée, le cas échéant); catégorie x 2 = marqué par une asymétrie de charge et une asymétrie de posture.

Les variations inter-essais de ces angles sont aussi importantes pour les soulèvements et les dépôts à une hauteur intermédiaire basse (H2). On note également des différences interindividuelles importantes, certains individus ayant adopté des postures de travail marquées par une forte constance entre les essais d'une même condition (faible écart type), alors que d'autres ont affiché une très grande variabilité intra-individuelle. Parmi les cas extrêmes observés lors du soulèvement d'une caisse de 15 kg du sol (H1), on a observé des écarts types de l'angle au genou de 3° pour certains individus et un écart type de 49° pour un autre participant. Des variations de l'écart type de 2 à 22° ont été observées pour l'inclinaison du dos. Ces grandes différences interindividuelles expliquent en partie la difficulté de statuer sur les deux courants théoriques de la signification de la variabilité motrice d'un geste. À tout le moins, ces valeurs donnent un aperçu des limites fonctionnelles de la variabilité liée aux postures, car les gestes observés n'étaient ni instables ou stéréotypés d'une condition à une autre (James, 2004; Stergiou *et al.*, 2006). Les valeurs élevées de variabilité motrice rapportée dans cette analyse ne sont pas dues à une absence de maîtrise du geste, comme on pourrait parfois l'observer durant la phase d'apprentissage d'un geste complexe chez les novices (Delignières *et al.*, 2009).

Au niveau de la coordination

Le mode de synchronisation préférentiel entre l'angle au genou et l'inclinaison du dos est majoritairement séquentiel plutôt que synchronisé. Le pourcentage moyen de temps passé en mode synchronisé (entre l'articulation du genou et l'inclinaison du dos) se situait autour de 33 % du temps de phase (tableau 3). Les variations inter-essais du mode de coordination ont été plus importantes au fur et à mesure que la hauteur des manipulations s'éloignait du sol (Soulèvement : $p < 0,01$; Dépôt (participants-hommes) : $p = 0,06$; tableau 4), c'est-à-dire plus régulières lors des manipulations près du sol et plus variables lors des manipulations à hauteur haute.

Ces résultats peuvent paraître en contradiction avec les résultats de Plamondon et collaborateurs (Plamondon *et al.*, 2014), qui indiquaient que les femmes adoptaient un mode de coordination lors du soulèvement de charge plus séquentiel (Genoux, Hanches, Dos) que les hommes. L'absence de différence entre nos groupes hommes et femmes, et entre nos groupes d'experts et de novices sont en effet des faits saillants ici. Notons toutefois qu'en plus de la tâche qui était différente (au niveau des combinaisons de hauteur de soulèvement et de dépôt), que la méthode utilisée diffère entre les études pour juger de la coordination pluri articulaire. Dans un cas, la méthode a été développée pour analyser la coordination d'un mouvement cyclique (Plamondon *et al.*, 2014) alors que dans notre cas, la méthode de Fineman et Stirling (Fineman et Stirling, 2017) a été développée pour des tâches discrètes. Il est aussi important de préciser que les conditions initiales du mouvement pour appliquer la méthode de Fineman et Stirling (2017) doivent demeurer relativement constantes. Considérant que la coordination entre l'angle au genou et l'inclinaison du dos lors du soulèvement et du dépôt dépend fortement l'attitude posturale au moment d'entamer le mouvement, cela peut avoir grandement influencé les résultats. Pour une posture en 'Stoop' ou en 'Squat', il y a un débalancement de l'amplitude de mouvement entre les articulations, ce qui influence indubitablement la coordination vers une posture plus érigée ou fléchie. À refaire, la méthode de Fineman et Stirling (Fineman et Stirling, 2017) serait appliquée pour comprendre les adaptations pour une même famille/catégorie de posture du corps.

Au niveau de l'asymétrie

Au moment du soulèvement, le mode opératoire le plus fréquent est marqué par une asymétrie de charge et une asymétrie de posture pour les hauteurs intermédiaires hautes (H3) et hautes (H4) (tableau 3). Pour les autres hauteurs plus basses au soulèvement et pour les dépôts de caisses aux différentes hauteurs, le mode opératoire prévalent est dénué d'asymétrie; les participants faisant essentiellement face à la charge à manipuler. Il semble donc y avoir une forme de symétrisation de la gestuelle lorsque les contraintes deviennent importantes (p. ex. une manipulation près du sol) (Authier, Gagnon et Lortie, 1995).

Les variations inter-essais de l'angle de torsion sont dans le même ordre de grandeur que celles de l'inclinaison du dos. On note principalement que les variations inter-essais de l'angle de torsion sont plus faibles en H1-sol (Soulèvement (participants-hommes) : $p < 0,01$; Dépôt : $p < 0,01$; tableau 4) et plus importantes pour les dépôts aux hauteurs intermédiaires (H2 et H3) comparativement aux autres hauteurs ($p < 0,01$). L'effet Hauteur sur les variations inter-essais de la distance asymétrique de la caisse est significatif au dépôt des caisses seulement, indiquant que les variations inter-essais sont plus faibles lorsque les dépôts ont été réalisés au sol et plus élevées lorsque les dépôts ont été effectués à une hauteur intermédiaire haute (H3) ($p < 0,01$).

Concernant l'effet Masse, on note une diminution des variations inter-essais des asymétries de posture et de charge variant de 12 à 17 % lorsque les participants (hommes) ont manipulé les caisses lourdes (23 kg). L'interaction significative entre les effets Hauteur et Masse de l'écart type de l'inclinaison du dos indique que le dépôt des caisses plus lourdes (23 kg) à la hauteur intermédiaire basse (H2) a engendré une augmentation de la variation inter-essais (H2 : +25 %) alors que les dépôts des caisses de 23 kg aux autres hauteurs ont été associés soit à une diminution de la variation inter-essai (H3 : -21 %) ou à une absence de différence entre les conditions de Masse (H1-Sol et H4).

Dans l'étude de Granata et collaborateurs (1999), les auteurs ont montré que l'effet Masse (augmentation de la masse de 13,6 à 27,3 kg) avait contribué à diminuer la variation inter-essai des pics de vitesse (-13 %) et d'accélération (-18 %) de l'angle lombaire dans le plan sagittal durant le soulèvement jusqu'à une position verticale. La tendance des effets rapportée est donc semblable à celle de notre étude, mais la nature des changements due à une augmentation de la masse n'est pas identique. Granata et collaborateurs (1999) ont observé des effets uniquement dans le plan sagittal au niveau de la vitesse et de l'accélération angulaires au dos, mais pas d'effet dans les plans asymétriques. Nos résultats font état d'un effet Masse au niveau des postures asymétriques seulement. Cette différence peut s'expliquer par la tâche et les contraintes associées qui étaient très différentes. La tâche de l'étude de Granata et collaborateurs (1999) impliquait le soulèvement d'une caisse jusqu'à une position du corps érigée sans relâchement de la caisse. Le soulèvement se faisait les pieds en place, et nécessitait aucun déplacement du corps. La tâche demandée aux participants de nos études consistait à transférer une caisse d'un emplacement à un autre. Ces emplacements étaient distancés de 1,5 mètre, ce qui exigeait un enchaînement de mouvements pour soulever la caisse, la déplacer et la déposer dans un tout coordonné.

Tableau 4. Sommaire des résultats des équations d'estimation généralisées concernant le soulèvement et le dépôt d'une caisse à une des quatre hauteurs sur le diable

Variables : écart type de l'inclinaison du dos, de l'angle de flexion au genou, du % de temps en synchronisme (angle au genou vs inclinaison du dos), de la distance asymétrique et de la torsion.

		Équation d'estimation généralisée (EEG) ¹				Équation d'estimation généralisée (EEG) ² (Groupe d'hommes seulement)						EEG ³			
		Hauteur (H)		Sexe/Genre*		Effet simple Hauteur (H)		Effet simple Masse (M)		Interaction H x M		Effet simple Surplus de poids*		Effet simple Expertise*	
Variabilité (Écart Type)		P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet
<i>Au soulèvement</i>	<i>Inclinaison du dos</i>	<0.01	↘	0.47		<0.01	↘	0.13	(-5%)	0.84		0.81		<0.01	-28%
	<i>Angle de flexion au genou</i>	<0.01	↘	0.81		<0.01	H1>H3, H4 H4<Tous	0.52		0.44		0.20		0.45	
	<i>Coordination synchronisée</i>	<0.01	↗	0.11	(-5%)	<0.01	H1<H3, H4 H4>H2	0.02	-9%	0.74		0.62		0.24	
	<i>Distance asymétrique</i>	0.19		<0.01	-31%	0.07	H4<H3	<0.01	-15%	0.41		0.84		<0.01	-38%
	<i>Torsion</i>	0.23		0.03	-21%	0.03	H1<Tous	<0.01	-12%	0.83		0.59		<0.01	-34%
<i>Au dépôt</i>	<i>Inclinaison du dos</i>	<0.01	H1>H2, H4 H4<H3	0.79		<0.01	↘	0.45		<0.01	H2 +25% H3 -21%	0.71		<0.01	-28%
	<i>Angle de flexion au genou</i>	<0.01	↘	0.78		<0.01	↘	0.26		0.09	H3 +13%	0.70		0.36	
	<i>Coordination synchronisée</i>	0.32		0.01	-10%	0.06	H1<H2, H3	0.03	-9%	0.15		0.50		0.17	H2 -26%
	<i>Distance asymétrique</i>	<0.01	H1<Tous H4<H3	0.11	(-22%)	<0.01	H1<Tous H4<H3	<0.01	-17%	0.37		0.23		0.12	-26%
	<i>Torsion</i>	<0.01	H1<Tous H4<H2, H3	0.04	-15%	<0.01	H1<Tous H4<H3	<0.01	-15%	0.55		0.16		0.03	-29%

* Comparaison de groupes; ↗ : signifie que la variabilité croît plus lorsque les manutentions s'éloignent du sol ; ↘ : signifie que la variabilité croît plus lorsque les manutentions se font près du sol; le pourcentage (%) que l'on retrouve dans les colonnes 'Effet' indique le rapport de la variabilité entre deux éléments comparés : pour le Genre/Sexe, le % indique le rapport entre les manutentionnaires femmes versus les hommes [(F - H) *100/ H]; pour la Masse, le % indique le rapport entre les valeurs des essais à 23 kg versus celles des essais à 15 kg [(23 kg - 15 kg) *100/ 15 kg]; pour l'effet Surplus de poids, le % indique le rapport entre les manutentionnaires hommes en surplus de poids et ceux de poids santé [(Surplus - Santé)/Santé*100]; pour l'Expertise, le % indique le rapport entre les manutentionnaires experts hommes et ceux novices [(Expert - Novice)/Novice *100]; les cases qui ont une trame de fonds rosée indiquent une interaction significative entre le facteur de la colonne et un autre facteur indiqué dans la case. Les pourcentages entre parenthèses indiquent le rapport observé bien que l'effet observé ne soit pas significatif (p<0,15). ¹ EEG incluant tous les participants hommes (n=50) et femmes; ² EEG réalisée avec le groupe d'hommes seulement, l'effet simple Masse permet de comparer les moyennes obtenues pour les conditions réalisées avec les caisses de 15 kg avec celles de 23 kg; ³ EEG réalisée avec les participants experts (n=15) et ceux novices (n=15).

Jeu de pieds

Dans la majorité des transferts impliquant une caisse au sol, au moment de la soulever (78 % des transferts) ou de la déposer (83 % des transferts), les participants ont adopté une position des pieds faisant face à la charge manipulée (tableau 5). Ces résultats concordent avec les observations ergonomiques de Authier et collaborateurs (Authier, Gagnon et Lortie, 1995). On retrouve cette même position des pieds lors des actions de déposer les caisses aux autres hauteurs, mais à une fréquence moins élevée (50-65 %) et par le fait même avec plus de variations inter-essais, notamment au niveau des hauteurs intermédiaires basses et hautes (H2 et H3). Au soulèvement, on remarque que l'orientation des pieds, au moment de soulever des caisses à une hauteur intermédiaire haute et haute (H3 et H4), était plutôt dirigée à mi-chemin entre la zone de soulèvement et celle du dépôt, reflétant un mode transition dans le mouvement moins segmenté par phase (plus en continu). Une variation inter-essai croissante a été observée en fonction de la hauteur de soulèvement ($p < 0,01$), suggérant un patron de mouvement plus constant lorsque le soulèvement de la caisse s'effectuait à partir du sol et de plus en plus variable pour les hauteurs intermédiaires et hautes (tableau 6). L'effet Masse a été observé sur presque tous ces paramètres : on note une diminution des variations inter-essais de 8 à 16 % lorsque les participants (hommes) ont manipulé les caisses lourdes (23 kg).

Les valeurs extrêmes des mesures d'orientation des pieds des 12 essais de chaque participant s'avèrent très élevées; fluctuant en moyenne de 41 à 75°, de 19 à 34 cm en ML et 39 à 66 cm en AP pour une même tâche à réaliser. Pourtant, certains participants ont affiché une constance étonnante au niveau de l'orientation des pieds (écarts types $< 6^\circ$) et de l'espacement entre ceux-ci (< 4 cm). Les différences interindividuelles sont donc bien présentes sur cette dimension aussi. Certaines composantes de la signature semblent se rigidifier en fonction d'un accroissement des contraintes. Pour les charges manipulées au sol et les charges lourdes, on observe une rigidification du placement des pieds, comparativement aux charges moins lourdes et déposées en hauteur. Rappelons que plus que la variation intra-individuelle est faible, plus on tend à observer un comportement stéréotypé, alors que lorsqu'elle est importante, plus cela reflète la plage de possibilités exploitée pour réaliser la tâche. L'amplification des contraintes du contexte de la tâche semble donc pointer dans la direction d'une diminution d'une marge de manœuvre du manutentionnaire.

Bras de résistance

Pour une grande majorité des essais, les participants ont effectué très peu de prémanceuvres leur permettant de rapprocher la caisse et la saisir à proximité de leur corps (tableau 5). Cela peut s'expliquer par le fait que les participants pouvaient eux-mêmes se rapprocher de l'objet à déplacer sur le diable (aucune contrainte dans l'environnement ne les empêchant de le faire), ou que l'objet était déjà assez près d'eux. Bien que l'on ait noté des bras de résistance au soulèvement et au dépôt qui étaient plus élevés plus les caisses manipulées étaient près du sol, les variations inter-essais du bras de résistance au soulèvement étaient similaires entre les hauteurs (tableau 6). Elles étaient plus faibles pour les caisses plus lourdes (7 %; $p = 0,03$). Au dépôt, les plus importantes variations inter-essais du bras de résistance au dépôt étaient observées aux hauteurs intermédiaires hautes et hautes. Ces hauteurs de dépôt sont moins contraignantes que celles plus basses, elles sont possiblement plus propices à de plus grandes variations inter-essais.

Tableau 5. Sommaire des statistiques descriptives des variables liées au positionnement des pieds et au bras de résistance au moment du soulèvement des caisses du diable et du dépôt des caisses sur le diable, et à la prémanœuvre.

Les cases en jaune renseignent sur les catégories les plus fréquentes et l'indice de dispersion des paramètres de la signature (Position des pieds et Prémanœuvre) en fonction des différentes conditions expérimentales.

Variables	Dépôt (vers une des quatre H du diable)				Soulèvement (une des quatre H du diable)			
	H1	H2	H3	H4	H1	H2	H3	H4
<i>Orientation Pied Ipsi (°)</i>								
Moyenne	38.8	36.9	37.5	26.7	44.4	53.9	62.3	66.3
Étendue de la variation (max-min)	41	56	61	51	42	55	64	75
Écart type	±12.6	±17.9	±19.2	±15.9	±13.2	±17.1	±20.3	±23.6
<i>Orientation Pied Contra (°)</i>								
Moyenne	-10.7	-0.8	2.7	-4.6	-4.1	14.3	29.3	34.0
Étendue de la variation (max-min)	43	55	67	54	47	51	56	53
Écart type	±13.1	±17.0	±21.0	±16.6	±14.2	±16.3	±17.6	±15.8
<i>Distance entre Pieds X (cm)</i>								
Moyenne	38.5	31.7	26.4	25.7	36.9	28.7	18.7	14.5
Étendue de la variation (max-min)	24	30	28	19	25	32	34	34
Écart type	±7.6	±9.8	±8.7	±5.8	±7.8	±10.8	±11.2	±11.0
<i>Distance entre Pieds Y (cm)</i>								
Moyenne	14.2	14.2	11.8	4.0	15.8	24.6	26.7	26.1
Étendue de la variation (max-min)	42	63	66	55	39	44	49	48
Écart type	±13.5	±20.7	±21.8	±17.6	±12.8	±13.9	±15.8	±15.3
Signature – Position des pieds								
Catégorie la plus fréquente	Face	Face	Face	Face	Face	Face	Parallèle	Parallèle
Fréquence	83%	65%	50%	61%	78%	55%	48%	58%
Indice de dispersion	1.26	1.68	1.88	1.81	1.29	1.56	1.61	1.48
<i>Prémanœuvre – Rapprochement Caisse (cm)</i>								
Moyenne					7.6	8.7	10.3	9.9
Étendue de la variation (max-min)					11	10	11	12
Écart type					±3.5	±3.1	±3.4	±3.7
<i>Bras de résistance (cm)</i>								
Moyenne	48.4	46.4	40.4	36.5	45.9	43.4	36.2	30.5
Étendue de la variation (max-min)	10	12	15	15	11	11	12	11
Écart type	±3.0	±3.6	±4.7	±4.4	±3.3	±3.4	±3.7	±3.4
Signature – Prémanœuvre								
Catégorie la plus fréquente					Non-Ext	Non-Ext	Non-Ext	Non-Int
Fréquence					81%	64%	41%	59%
Indice de dispersion					1.47	1.69	1.84	1.71

H = hauteur (H1 = au sol; H2 = hauteur intermédiaire basse; H3 = hauteur intermédiaire haute; H4 = hauteur haute); ° = dimension exprimée en degrés; Face = Les pieds font face à la caisse à manipuler; Parallèle = Les pieds sont orientés à mi-chemin entre le lieu de prise et de dépôt. Non-Ext = Aucun rapprochement et bras de résistance à l'extérieur de la zone sécuritaire; Non-Int = Aucun rapprochement et bras de résistance à l'intérieur de la zone sécuritaire.

Tableau 6. Sommaire des résultats des équations d'estimation généralisées concernant le soulèvement et le dépôt d'une caisse à une des quatre hauteurs sur le diable.Variables : écart type des variables liées au positionnement des pieds et au bras de résistance.

		Équation d'estimation généralisée (EEG) ¹				Équation d'estimation généralisée (EEG) ² (Groupe d'hommes seulement)						EEG ³			
		Hauteur (H)		Sexe/Genre*		Effet simple Hauteur (H)		Effet simple Masse (M)		Interaction H x M		Effet simple Surplus de poids*		Effet simple Expertise*	
Variabilité (Écart Type)		P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet
<i>Au soulèvement</i>	<i>Orientation Pied Ipsi</i>	<0.01	↗	0.57		<0.01	H1<Tous H4>H2	<0.01	-16%	0.88		0.31		<0.01	-29%
	<i>Orientation Pied Contra</i>	0.06	H1<H2,H3	0.28		0.02	H1<H3,H4	0.20		0.55		0.51		<0.01	-23%
	<i>Distance entre Pieds X</i>	<0.01	H1<Tous	<0.01	-30%	<0.01	H1<Tous H4<H3	0.06	-8%	0.43		0.05	-25%	0.01	-36%
	<i>Distance entre Pieds Y</i>	<0.01	H1<Tous	<0.01	-32%	0.21		<0.01	-16%	0.94		0.46		0.01	-39%
	<i>Bras de résistance</i>	0.36		<0.01	-22%	0.41		0.03	-7%	0.95		0.04	-17%	<0.01	-30%
<i>Au dépôt</i>	<i>Orientation Pied Ipsi</i>	<0.01	H1<Tous H4<H3	0.15		<0.01	H1<Tous H4<H3	<0.01	-14%	0.09	H2 -26% H3 -15%	0.01	-35%	0.07	-30%
	<i>Orientation Pied Contra</i>	<0.01	H1<Tous H4<H3	0.14	(-16%)	<0.01	H1<Tous H4<H3	0.03	-8%	0.73		0.10	-17%	0.04	-28%
	<i>Distance entre Pieds X</i>	<0.01	H1<H3 H4<Tous	<0.01	-34%	<0.01	H1<H2,H3 H4<Tous	0.99		0.11		0.02	-26%	0.07	-29%
	<i>Distance entre Pieds Y</i>	<0.01	H1<Tous H4<H3	0.15		<0.01	H1<Tous H4<H3	<0.01	-13%	0.52		0.21		0.07	-30%
	<i>Bras de résistance</i>	<0.01	H1<Tous H4>H2	0.08	-18%	<0.01	H1<Tous H4<H3	0.35		0.61		0.01	-26%	<0.01	-38%

* Pour faciliter l'interprétation des données présentées dans ce tableau, veuillez-vous référer aux notes en bas du tableau 4.

Transition de la caisse

Cette sous-section met l'accent sur les variables qui caractérisent le déplacement des caisses durant les tâches aller et retour. Rappelons que la distance des caisses en ligne droite dans le plan horizontal entre le point de soulèvement et le point de dépôt est équivalente à 1,5 mètre, peu importe la condition répétée. La transition de la caisse entre ces deux points est marquée par des modes opératoires peu fluide et coûteux (travail mécanique) pour les caisses manipulées à la hauteur du sol et à une hauteur intermédiaire basse, et plus fluide et économique (travail mécanique) pour les hauteurs intermédiaires hautes et hautes (tableau 7). On observe des durées de mise sous charge généralement plus rapide à la hauteur haute (H4) pour les tâches aller et retour, soit 300ms plus rapide que les manipulations près du sol, des vitesses de déplacement de la caisse plus élevées (pour la tâche aller seulement), un ratio de secousse minimale de la caisse et de distance parcourue verticale plus faibles. Les variations inter-essais de ces paramètres sont proportionnelles aux amplitudes observées aux différentes hauteurs, et en absolu on observe plus de variabilité lorsque les charges étaient manutentionnées près du sol notamment parce que les durées, le travail mécanique et le ratio de secousse minimale sont plus importants (tableau 8). En relatif (p. ex. Écart type/Moyenne), ces effets sont estompés ou inversés. Par exemple, pour les durées de mise sous charge, les variations relatives des différentes conditions (aller et retour) varient entre 11 et 13 %, soit à peu près constantes, pour les autres variables, les variations relatives les plus faibles sont observées lorsque les charges étaient manutentionnées près du sol.

L'augmentation de la masse de la charge à déplacer a pour effet de diminuer les variations inter-essais des vitesses de déplacement des caisses (19-20 %; $p < 0,01$; tableau 8). Le dépôt de caisses de 23 kg à une hauteur intermédiaire basse (aller) a occasionné une augmentation de la variation inter-essais de la durée par rapport aux caisses de 15kg (24 %, $p < 0,05$), alors que pour les autres hauteurs, l'effet Masse n'a pas été observé (tableau 8). Cette augmentation de la variation inter-essai de la durée de transfert, jumelée à celle observée pour l'inclinaison du dos pour cette même condition, pourrait être le reflet d'un inconfort ou d'une difficulté autour d'une zone de travail moins familière, sollicitant des solutions motrices moins stables.

Jumelé à une orientation des pieds plus ouverte lorsque les caisses sont en direction ou en provenance d'une hauteur plus élevée (tableau 5), le déplacement des caisses transite aussi par un mode moins segmenté par phase et davantage vers un mode plus en continu. Contrairement aux soulèvements réalisés à des hauteurs intermédiaires hautes et hautes, les dépôts de caisses à ces hauteurs permettent de maintenir la caisse près du corps pendant une plus longue partie de la phase de transition (tableau 7).

Tableau 7. Sommaire des statistiques descriptives des variables liées à la secousse minimale, la distance verticale parcourue et la vitesse maximale résultante de la caisse durant le transfert, la durée du transfert des caisses et le pourcentage de la Durée du transfert où la caisse demeure à proximité du corps

Les cases en jaune renseignent sur les catégories les plus fréquentes et l'indice de dispersion des paramètres de la signature (Proximité corps-caisse et Fluidité et travail mécanique) en fonction des différentes conditions expérimentales.

Variables	Convoyeur au diable (dépôt à une des quatre H)				Diable au convoyeur (soulèvement à une des quatre H)			
	H1	H2	H3	H4	H1	H2	H3	H4
<i>Durée du transfert (ms)</i>								
Moyenne	2553	2334	2238	2218	2609	2366	2211	2321
Étendue de la variation (max-min)	1016	944	964	904	1021	946	968	812
Écart type	±308	±289	±287	±270	±307	±283	±261	±249
<i>Vitesse maximale caisse Transfert (cm/s)</i>								
Moyenne	125.4	127.8	132.0	135.7	130.9	128.1	127.0	125.9
Étendue de la variation (max-min)	37	44	55	57	48	52	42	37
Écart type	±11.1	±13.1	±16.4	±17.1	±14.5	±15.8	±12.5	±11.3
<i>Proximité Corps-Caisse (% temps transfert)</i>								
Moyenne	36.7	47.1	56.6	59.7	43.1	43.6	53.9	59.3
Étendue de la variation (max-min)	29	34	38	38	33	36	33	31
Écart type	±9.3	±11.0	±12.4	±12.2	±10.7	±11.2	±10.4	±9.8
Signature – Proximité corps-caisse								
Catégorie la plus fréquente	33-66%	33-66%	66-100%	66-100%	33-66%	33-66%	33-66%	33-66%
Fréquence	54%	49%	45%	47%	54%	46%	41%	50%
Indice de dispersion	1.41	1.45	1.49	1.59	1.50	1.43	1.41	1.44
<i>Ratio de la secousse minimale caisse</i>								
Moyenne	14.9	13.4	11.2	10.7	16.7	13.2	9.3	9.1
Étendue de la variation (max-min)	24	22	20	20	31	25	15	14
Écart type	±7.3	±6.7	±6.2	±6.0	±9.1	±7.6	±4.8	±4.1
<i>Distance parcourue verticale Caisse (cm)</i>								
Moyenne	95.9	67.9	22.7	6.2	91.6	63.6	16.2	-1.9
Étendue de la variation (max-min)	41	35	21	17	45	38	21	15
Écart type	±12.9	±11.1	±6.3	±5.0	±13.8	±11.4	±6.6	±4.4
Signature – Fluidité et travail mécanique								
Catégorie la plus fréquente	PF&C	PF&C	F&E	F&E	PF&C	PF&C	F&E	F&E
Fréquence	58%	51%	45%	52%	62%	57%	63%	65%
Indice de dispersion	1.44	1.52	1.89	1.49	1.36	1.58	1.65	1.39

H = hauteur (H1 = au sol; H2 = hauteur intermédiaire basse; H3 = hauteur intermédiaire haute; H4 = hauteur haute);
PF&C = Peu fluide et coûteux; F&E = Fluide et économique.

Tableau 8. Sommaire des résultats des équations d'estimation généralisées concernant le soulèvement et le dépôt d'une caisse à une des quatre hauteurs sur le diable

Variables : écart type de la durée du transfert, et de la vitesse maximale résultante, du ratio de la secousse minimale et de la distance parcourue verticale de la caisse.

	Équation d'estimation généralisée (EEG) ¹				Équation d'estimation généralisée (EEG) ² (Groupe d'hommes seulement)								EEG ³	
	Hauteur (H)		Sexe/Genre*		Effet simple Hauteur (H)		Effet simple Masse (M)		Interaction H x M		Effet simple Surplus de poids*		Effet simple Expertise*	
Variabilité (Écart Type)	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet
<u>Du convoyeur au diable</u>														
<i>Durée du transfert</i>	0.22		0.28		<0.01	H4<Tous	0.13		0.02	H2 +24%	0.98		0.22	
<i>Vitesse maximale caisse transfert</i>	<0.01	H1<Tous H4>H2	<0.01	-28%	<0.01	H1<Tous H4>H2	<0.01	-20%	0.30		0.01	-21%	0.28	
<i>Ratio de la Secousse minimale Caisse</i>	0.23		0.79		0.10	H1>H2,H4	<0.01	+18%	0.44		0.49		0.15	H1 +57% H3 +59%
<i>Distance parcourue verticale Caisse</i>	<0.01	H1>H3,H4 H4<Tous	0.33		<0.01	↘	0.85		0.10		1.00		<0.01	-34%
<u>Du diable au convoyeur</u>														
<i>Prémanceuvre – Rapprochement Caisse</i>	<0.01	H4>H2	0.64		0.41		0.34		0.14		<0.01	-24%	0.17	
<i>Durée du transfert</i>	<0.01	H1>H3,H4 H4<H2	0.03	-14%	<0.01	H1>H3,H4 H4<H2	0.98		0.35		0.99		0.66	
<i>Vitesse maximale caisse transfert</i>	<0.01	H1>H4 H4<H2	<0.01	-31%	<0.01	H1>H3,H4 H4<H2	<0.01	-19%	0.35		0.09	-14%	0.14	(-18%)
<i>Ratio de la secousse minimale caisse</i>	<0.01	H1>H3,H4 H4<H2	0.20		<0.01	H1>H3,H4 H4<H2	0.56		0.43		0.41		0.27	
<i>Distance parcourue verticale Caisse</i>	<0.01	↘	<0.01	-27%	<0.01	↘	0.14	(-8%)	0.10	H1 -24%	0.93		0.45	

* Pour faciliter l'interprétation des données présentées dans ce tableau, veuillez-vous référer aux notes en bas du tableau 4.

Indice de dispersion

De manière générale, comme indiqué par les indices de dispersion (tableau 3, tableau 5 et tableau 7), on observe moins de variation entre les modes opératoires lorsque les caisses sont manutentionnées près du sol comparativement à aux hauteurs intermédiaires hautes et hautes (tableau 9). L'effet Hauteur représente une contrainte qui semblent restreindre les façons de faire pour déplacer les caisses d'un point A à un point B, c'est-à-dire forçant/contraignant le travailleur à utiliser les mêmes modes opératoires pour les transferts de caisse, ce qui est à l'opposé du concept de diversité (Mathiassen, 2006). Ces résultats complètent les observations précédentes, dans la mesure où l'indice de dispersion serait un indicateur lié à la diversité motrice, alors que les écarts types des différentes variables dépendantes offrent une image globale de la variabilité motrice des multiples répétitions du geste.

L'effet Masse est aussi marquant : le transfert d'une caisse plus lourde est associé à un indice de dispersion plus faible et donc à une constance plus présente des modes opératoires (tableau 9). Aucune exacerbation des effets sur l'indice de dispersion n'a été observée lors du pairage des contraintes 'plus difficiles'. Nous aurions pu nous attendre à une diminution accrue de l'indice de dispersion pour la condition hauteur au sol avec la masse de 23 kg. Il ne semble donc pas y avoir d'effet additif de contraintes sur l'indicateur de diversité motrice. Différentes explications peuvent être avancées : est-ce causé par la dominance d'une des contraintes, parce que les possibilités de réaliser le geste se trouvent déjà dans sa forme/expression minimale tel qu'indiqué par des valeurs relativement faibles des indices de dispersion, ou parce qu'il s'agit d'une limite de la méthode et de sa sensibilité au concept de diversité motrice. Il s'agit d'un concept relativement nouveau qui n'a pas encore été développé outre mesure. On ne retrouve pas d'équivalent dans la littérature scientifique.

Le constat final semble pointer dans une seule direction. Les possibilités d'actions, ou modes opératoires, semblent plus limitées dans un contexte de travail caractérisé par la présence de contraintes dominantes (Coutarel *et al.*, 2015).

Tableau 9. Comparaison des indices de dispersion moyens de chacun des paramètres de la signature gestuelle

	Équation d'estimation généralisée (EEG) ¹				Équation d'estimation généralisée (EEG) ² (Groupe d'hommes seulement)								EEG ³	
	Hauteur (H)		Sexe/Genre*		Effet simple Hauteur (H)		Effet simple Masse (M)		Interaction H x M		Effet simple Surplus de poids*		Effet simple Expertise*	
	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet
Prémanceuvre	<0.01	H1<Tous	0.36		<0.01	H1<H3,H4 H2<H3	0.01	-6%	0.24		<0.01	-16%	0.49	
Position des pieds -Soulèvement	<0.01	H1<Tous	0.11	(-8%)	0.24		<0.01	-8%	0.92		0.41		0.12	(-13%)
Posture du corps – Soulèvement	<0.01	H4>Tous	0.78		0.01	H4>Tous H2>H3	0.02	-6%	0.49		0.93		0.34	
Asymétrie - Soulèvement	<0.01	H1<Tous H2<H4	0.39	H1 -14% H4 +25%	0.34		<0.01	-12%	0.23		0.17		0.08	-11%
Coordination - Soulèvement	<0.01	↗	0.12	H2 -15%	<0.01	↗	<0.01	-11%	0.80		0.57		0.51	
Proximité corps-caisse – Aller	0.04	H4>Tous	0.12	(+7%)	0.20		0.23		0.08		0.71		0.35	
Proximité corps-caisse – Retour	0.56		0.65	H1 +25%	0.19		0.36		0.20		0.83		0.12	(-11%)
Fluidité et travail mécanique – Aller	<0.01	H3>Tous	0.49		<0.01	H3>Tous	<0.01	-8%	0.69		0.79		0.02	-14%
Fluidité et travail mécanique – Retour	0.01	H1<H2,H3 H4<H2,H3	0.90		<0.01	H1<H2,H3 H4<H2,H3	<0.01	-9%	0.55		0.51		0.07	-10%
Position des pieds –Dépôt	<0.01	H1<Tous H2<H3	0.75		<0.01	H1<Tous H2<H3,H4	<0.01	-11%	0.74		0.11	H1 -17% H2 -20%	0.03	-18%
Posture du corps – Dépôt	<0.01	↗	0.83		<0.01	H1<Tous H2>H3,H4	0.01	-6%	0.80		0.59		<0.01	-13%
Asymétrie – Dépôt	<0.01	H1<Tous H3>Tous	0.32		<0.01	H1<Tous	<0.01	-13%	0.96		0.12	(-9%)	<0.01	-25%
Coordination - Dépôt	<0.01	H4>Tous H1<H2	0.06	-8%	<0.01	H1<Tous	<0.01	-9%	0.18		0.40		0.13	(-7%)

* Pour faciliter l'interprétation des données présentées dans ce tableau, veuillez-vous référer aux notes en bas du tableau 4.

Chargements externes à L5/S1

Les effets Hauteur et Masse ont une influence significative sur les valeurs normalisées des moyennes et des écarts types des moments de force au soulèvement et au dépôt, et des impulsions angulaires à L5/S1 (tableau 10, tableau 11 et tableau 12). La manutention des caisses en provenance ou en direction du sol a occasionné des chargements externes au dos et des impulsions angulaires en sagittal plus élevés que les autres hauteurs ($p < 0,01$). À l'opposé, les chargements à L5/S1 asymétriques étaient généralement plus faibles lorsque les caisses étaient soulevées du sol ou déposées au sol comparativement aux autres hauteurs. Au soulèvement des caisses du diable, on retrouve des chargements à L5/S1 asymétriques les plus élevés à H3, alors qu'au dépôt des caisses sur le diable, les valeurs les plus élevées sont à H2 et H3 (tableau 11). Globalement, la manutention des caisses plus lourdes a nécessité des chargements externes au dos et des cumuls plus élevés ($p < 0,05$; tableau 11 et tableau 12). Des interactions significatives entre les effets Hauteur et Masse indiquent que la manutention des caisses plus lourdes à H4 a été associée à une exacerbation des effets observés en asymétrie comparativement aux autres hauteurs de manutention ($p < 0,05$; tableau 11). L'ensemble de ces résultats ont également été rapportés par d'autres études (Corbeil *et al.*, 2019; Plamondon, Denis, Bellefeuille, *et al.*, 2010).

Pour les différentes hauteurs de manutention, les variations inter-essais des chargements externes au dos en sagittal au soulèvement et au dépôt sont de même amplitude (tableau 11). Ce qui n'est le cas des variations inter-essais des impulsions angulaires en sagittal qui étaient plus élevées pour les caisses au sol et moins élevée pour les caisses hautes ($p < 0,01$; tableau 12). L'augmentation de ces variations inter-essais ne serait donc pas due aux variations inter-essais des chargements lombaires au soulèvement et au dépôt, mais plutôt aux variations observées durant la phase de transition, c'est-à-dire à la dynamique du mouvement de transition et/ou aux variations observées des durées de mise sous charge. Pour les deux tâches, les variations inter-essais des chargements à L5/S1 asymétriques étaient plus faibles pour les caisses au sol comparativement aux hauteurs intermédiaires ($p < 0,01$; tableau 11). On observe donc moins de chargement en asymétrie lors de la manutention de charge au sol et moins de variation inter-essai de ces chargements aussi. Aucune différence n'a été observée entre les variations inter-essais des impulsions angulaires à L5/S1 des différentes tâches et hauteurs de manutention (tableau 12). Les variations inter-essais de l'ensemble de ces variables étaient globalement plus importantes lors de la manutention des caisses plus lourdes (tableau 11 et tableau 12). Donc plus la caisse est lourde, plus les chargements lombaires augmentent et plus les variations inter-essais augmentent aussi (Granata *et al.*, 1999; Mirka et Baker, 1996). À l'opposé, ce que l'on retient des sous-sections précédentes, c'est que l'on observe moins de variations des modes opératoires lorsque la charge manutentionnée est plus lourde. Granata et collaborateurs (1999) ont également observé ces résultats : l'augmentation de la masse de la caisse a eu pour effet d'augmenter la variabilité des forces de compression au niveau lombaire et de diminuer la variabilité associée à la vitesse et à l'accélération angulaire du tronc dans le plan sagittal. Il est intéressant de noter qu'une augmentation de la variabilité inter-essai associée aux chargements lombaires n'implique pas nécessairement une plus grande variabilité/diversité motrice des modes opératoires.

Tableau 10. Sommaire des statistiques descriptives des variables liées aux efforts au dos tel qu'estimé par les moments de force à L5/S1

La portion haute du tableau concerne les moments de force au moment du soulèvement des caisses à partir du diable et du dépôt des caisses sur le diable. La portion inférieure du tableau contient les valeurs des impulsions angulaires (cumuls des moments de force) à L5/S1 pour les deux tâches (du convoyeur au diable et du diable au convoyeur).

Variables		Dépôt (vers une des quatre H du diable)				Soulèvement (une des quatre H du diable)			
		H1	H2	H3	H4	H1	H2	H3	H4
<i>Moment L5/S1 sagittal</i>									
	Moyenne	1.98	1.69	1.00	0.53	2.22	1.91	1.29	0.83
	Étendue de la variation (max-min)	0.58	0.57	0.66	0.62	0.62	0.58	0.59	0.59
	Écart type	±0.17	±0.17	±0.20	±0.18	±0.18	±0.17	±0.18	±0.17
<i>Moment L5/S1 asymétrique</i>									
	Moyenne	0.31	0.37	0.36	0.25	0.30	0.41	0.52	0.46
	Étendue de la variation (max-min)	0.41	0.53	0.56	0.38	0.46	0.52	0.59	0.53
	Écart type	±0.12	±0.16	±0.17	±0.12	±0.14	±0.16	±0.18	±0.16

Variables		Convoyeur au diable (une des quatre H)				Diable (une des quatre H) au convoyeur			
		H1	H2	H3	H4	H1	H2	H3	H4
<i>Impulsion angulaire L5/S1 sagittale</i>									
	Moyenne	3.39	2.82	2.24	2.00	3.41	2.96	2.51	2.40
	Étendue de la variation (max-min)	1.36	1.23	1.12	0.93	1.28	1.26	1.08	0.93
	Écart type	±0.41	±0.37	±0.33	±0.28	±0.39	±0.37	±0.32	±0.28
<i>Impulsion angulaire L5/S1 Asymétriques</i>									
	Moyenne	0.74	0.69	0.65	0.59	0.73	0.71	0.70	0.70
	Étendue de la variation (max-min)	0.43	0.41	0.40	0.37	0.41	0.44	0.42	0.41
	Écart type	±0.13	±0.13	±0.12	±0.11	±0.12	±0.13	±0.13	±0.12

* La procédure de normalisation des données consistait à diviser les moments de force et les impulsions angulaires par le moment exercé à L5/S1 du poids du tronc à l'horizontale du participant. Ainsi, ces moments de force normalisés sont exprimés en unité du poids du tronc et les impulsions angulaires en unité du poids du tronc seconde. La valeur moyenne du moment exercé à L5/S1 du poids du tronc à l'horizontale est de 93,0 Nm (écart type : 19,3 Nm; valeur minimale : 52,0 Nm; valeur maximale : 139,5 Nm). H = hauteur (H1 = au sol; H2 = hauteur intermédiaire basse; H3 = hauteur intermédiaire haute; H4 = hauteur haute).

Cette augmentation de la variabilité pourrait être expliquée par une augmentation de la variabilité de l'activation musculaire (figure 2). Bien que la relation entre le niveau de force à produire et la variabilité des forces générées demeure à être peaufinée (Salonikidis *et al.*, 2009), plusieurs chercheurs ont démontré que la variabilité de la force augmentait à mesure que le niveau de force augmentait (Newell et Carlton, 1988; Sherwood et Schmidt, 1980). Les mécanismes neuronaux responsables des variations de la force musculaire (fluctuation autour d'une valeur moyenne pendant des actions isométriques) seraient liés à certaines propriétés des unités motrices et à l'activation non uniforme de différents muscles agonistes et antagonistes (Enoka *et al.*, 2003). Cela dit, si la réponse musculaire était plus variable d'une répétition à une autre lors de la manutention de la charge plus lourde, il est fort possible d'anticiper plus de variation au niveau de la cinématique du geste. Que les indicateurs choisis ne supportent pas cette hypothèse est un constat, il demeure toutefois que d'autres aspects du geste, davantage liés à la dynamique du mouvement, pourraient être plus variables.

5.3.2 Variations interindividuelles

Effet du Genre/Sexe

Aucune différence entre les participants et les participantes n'a été notée pour la variation inter-essais de l'angle du genou ou de l'inclinaison du dos ($p > ,47$; tableau 4). Globalement, les manutentionnaires femmes ont affiché de 15 à 34 % moins de variations inter-essais que les hommes pour les mesures liées à l'asymétrie, l'espacement entre les pieds, le bras de résistance et la vitesse résultante maximale ($p < 0,08$; tableau 4, tableau 6 et tableau 8). En termes de diversité motrice, on note quelques interactions significatives entre le facteur Hauteur et le Genre/Sexe (Tableau 9). À noter, une plus grande constance des modes opératoires en asymétrie lors des soulèvements à partir du sol, et l'effet inverse observé à la hauteur haute ($p < 0,05$). Autrement, les indices de dispersion sont similaires entre les participants et les participantes.

On note une variation inter-essai de la durée de mise sous charge et de la distance verticale parcourue par la caisse plus faible pour les manutentionnaires femmes lorsqu'elles soulevaient les caisses du diable et les transféraient sur le convoyeur (14-27 %; $p < 0,05$; tableau 8). Ces effets n'ont pas été observés pour les transferts de caisse du convoyeur au diable, indiquant un effet spécifique à la tâche.

Les valeurs moyennes d'impulsion angulaire en sagittal étaient plus importantes chez les manutentionnaires femmes comparativement à leurs comparses au soulèvement et au dépôt des caisses de 15 kg (20-23 %; $p < 0,01$; tableau 12), alors que la variabilité associée à ces mesures n'était pas différente entre les groupes. Aucune différence entre les groupes n'a été observée au niveau des moyennes et des écarts types des chargements externes initiaux et finaux au dos en sagittal ($p > 0,10$; tableau 11). Plamondon et collaborateurs (Plamondon *et al.*, 2014) ont constaté le même résultat dans une tâche de transfert de caisses de palette à palette. L'écart au niveau des valeurs moyennes d'impulsion angulaire en sagittal est possiblement causé par une durée de mise sous charge plus élevée chez les manutentionnaires femmes. Pour les deux tâches (aller et retour), les moyennes et les écarts types des chargements asymétriques au dos étaient plus faibles chez les manutentionnaires femmes (réduction de 16-20 %; $p < 0,06$; tableau 11). Aucun effet Genre/Sexe significatif n'a été observé pour l'impulsion angulaire à L5/S1 en asymétrie ($p > 0,11$; tableau 12).

Tableau 11. Sommaire des résultats des équations d'estimation généralisées concernant le soulèvement et au dépôt d'une caisse à une des quatre hauteurs sur le diable

Variables : moyenne et écart type des moments de force L5/S1 normalisés dans le plan sagittal et de la résultante asymétrique.

		Équation d'estimation généralisée (EEG) ¹				Équation d'estimation généralisée (EEG) ² (Groupe d'hommes seulement)								EEG ³	
		Hauteur (H)		Sexe/Genre*		Effet simple Hauteur (H)		Effet simple Masse (M)		Interaction H x M		Effet simple Surplus de poids*		Effet simple Expertise*	
		P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet
Moyenne	Moment L5/S1 sagittal au soulèvement	<0.01	↘	0.10	+7%	<0.01	↘	<0.01	+15%	0.84		0.73		0.58	
	Moment L5/S1 asymétrique au soulèvement	<0.01	↗	0.02	-18%	<0.01	H1<Tous H4>H2 H4<H3	0.04	+4%	<0.01	H1 +9% H4 +8%	0.03	-25%	0.41	
	Moment L5/S1 sagittal au dépôt	<0.01	↘	0.47		<0.01	↘	<0.01	+19%	<0.01	H1-H3< +17% H4 +30%	0.69		0.24	
	Moment L5/S1 asymétrique au dépôt	<0.01	H1<H2,H3 H4<Tous	0.03	-20%	<0.01	H1<H2,H3 H4<Tous	0.10	+4%	0.02	H4 +12%	0.36		0.18	H1 -33%
Écart type	Moment L5/S1 sagittal au soulèvement	0.21		0.19		0.38		0.02	+10%	0.88		0.02	-17%	<0.01	-27%
	Moment L5/S1 asymétrique au soulèvement	<0.01	H1<H3,H4	<0.01	-16%	0.03	H1<H3,H4	0.31		0.17		0.20		0.04	-21%
	Moment L5/S1 sagittal au dépôt	0.13	(H4<H3)	0.13		0.06	H1<H3	<0.01	+21%	0.01	H2 +42% H4 +29%	0.02	-18%	0.15	(-15%)
	Moment L5/S1 asymétrique au dépôt	<0.01	H1<H2,H3 H4<H2,H3	0.06	-16%	<0.01	H1<H2,H3 H4<H2,H3	0.03	+9%	0.17		0.46		0.13	(-20%)

* Pour faciliter l'interprétation des données présentées dans ce tableau, veuillez-vous référer aux notes en bas du tableau 4.

Tableau 12. Sommaire des résultats des équations d'estimation généralisées concernant les tâches du convoyeur au diable (T1-aller) et du diable au convoyeur (T2-retour)

Variables : moyenne et écart type des impulsions angulaires (cumuls des moments de force) L5/S1 dans le plan sagittal et de la résultante asymétrique.

		Équation d'estimation généralisée (EEG) ¹				Équation d'estimation généralisée (EEG) ² (Groupe d'hommes seulement)							EEG ³		
		Hauteur (H)		Sexe/Genre*		Effet simple Hauteur (H)		Effet simple Masse (M)		Interaction H x M		Effet simple Surplus de poids*		Effet simple Expertise*	
		P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet	P	Effet
Moyenne	<i>Impulsion angulaire L5/S1 en sagittal T1</i>	<0.01	↘	<0.01	+23%	<0.01	↘	<0.01	+27%	0.09	H1,H2 +25% H3,H4 +29%	0.30		0.75	
	<i>Impulsion angulaire L5/S1 asymétrique T1</i>	<0.01	↘	0.27		<0.01	↘	<0.01	+12%	0.05	H2 +8% H1,H3,H4>+11%	0.18		0.61	
	<i>Impulsion angulaire L5/S1 en sagittal T2</i>	<0.01	↘	<0.01	+20%	<0.01	↘	<0.01	+28%	0.23		0.07	+17%	0.65	
	<i>Impulsion angulaire L5/S1 asymétrique T2</i>	<0.01	H1>Tous	0.11	(-10%)	0.77		<0.01	+17%	0.09	H1,H3,H4 +18% H2 +10%	0.02	+18%	0.67	
Écart type	<i>Impulsion angulaire L5/S1 en sagittal T1</i>	<0.01	↘	0.36		<0.01	H1>H3 H4<Tous	<0.01	+23%	0.28		0.61		0.06	-20%
	<i>Impulsion angulaire L5/S1 asymétrique T1</i>	0.06	H4<H1,H2	0.37		<0.01	H4<Tous	0.08	+7%	0.52		0.78		0.18	
	<i>Impulsion angulaire L5/S1 en sagittal T2</i>	<0.01	H1>H3 H4<Tous	0.60		<0.01	H1>H3,H4 H4<H2	<0.01	+16%	0.07	H2 +28% H4 +24%	0.61		0.23	M15 -3% M23 -22%
	<i>Impulsion angulaire L5/S1 asymétrique T2</i>	0.47		0.31		0.18		<0.01	+12%	0.10	H3 +27%	0.81		0.28	

* Pour faciliter l'interprétation des données présentées dans ce tableau, veuillez-vous référer aux notes en bas du tableau 4.

Dans une étude sur la locomotion sur tapis roulant exposant des participants hommes et femmes à 4 vitesses différentes de marche ou de course (Barrett, Noordegraaf et Morrison, 2008), les femmes ont affiché une variabilité des angles articulaires de la hanche, du genou et de la cheville plus faible que celle des hommes lorsqu'elles couraient à la vitesse la plus rapide de l'expérience (12 km/h). Svendsen et Madeleine (2010) ont comparé la variabilité motrice lors d'une tâche d'endurance en flexion du coude (force isotonique) entre des hommes et des femmes asymptomatiques. Ils ont observé que les forces produites par les femmes étaient moins variables que celles produites par les hommes. Ces résultats ont été attribués aux différences entre les sexes des mécanismes de contrôle. Côté (Côté, 2012) a suggéré que la variabilité motrice réduite chez les femmes par rapport aux hommes pourrait expliquer en partie pourquoi les femmes seraient plus à risque de développer des TMS.

Effet surplus de poids

Aucun effet du surplus de poids n'a été observé sur les variations inter-essais des mesures de postures, de coordination, et d'asymétrie (tableau 4). Ce qui est également le cas pour les mesures associées à la transition, à l'exception des variations inter-essais de la vitesse résultante maximale de la caisse qui étaient plus faibles pour les manutentionnaires en surplus de poids que les manutentionnaires hommes de poids santé (14-21 %; $p < 0,09$; tableau 8). Les variations inter-essais du bras de résistance et de certaines variables en lien avec le positionnement des pieds étaient également inférieures pour les participants avec un surplus de poids comparativement à ceux de poids santé (17-35 %, $p < 0,05$; tableau 6).

La procédure de normalisation des moments de force au dos permet de mener des comparaisons plus équitables des efforts requis entre des groupes ayant des masses corporelles différentes. Au moment de soulever des caisses, les manutentionnaires hommes avec un surplus de poids ont affiché des moments de force L5/S1 en sagittal équivalents à ceux de poids santé, des moments de force L5/S1 en asymétrie moins élevés (25 %; $p < 0,05$; tableau 11), et des impulsions angulaires à L5/S1 en sagittal et en asymétrie plus élevés (17-18 %; $p < 0,07$; tableau 12). Certains de ces résultats avaient été rapportés dans une étude précédente (Corbeil *et al.*, 2019). L'analyse des variations inter-essais indique que pour les tâches aller et retour, les manutentionnaires hommes avec un surplus de poids avaient une variation inter-essai de leur chargement au dos en sagittal moins importante que celle des manutentionnaires avec un poids santé (17-18 % moins élevée, $p < 0,05$; tableau 11); aucun effet significatif n'a été noté pour l'impulsion angulaire à L5/S1 (tableau 12). Cette diminution des variations inter-essais des chargements lombaires en sagittal chez les participants en surplus de poids pourrait être expliquée par un trait individuel et/ou par des adaptations des mécanismes de contrôle associées au surplus de poids des manutentionnaires. Considérant qu'en absolue, les individus en surplus de poids subissent des chargements lombaires plus importants que des individus de poids santé (Corbeil *et al.*, 2019), cette diminution de la variabilité inter-essai pourrait réduire le nombre relatif d'efforts répétés qui pourraient dépasser les limites sécuritaires liées au soulèvement et au dépôt de charge (Granata *et al.*, 1999; Waters *et al.*, 1993) ou, au contraire, augmenter la probabilité de provoquer une blessure de surutilisation (hypersollicitation) du dos (Srinivasan et Mathiassen, 2012b).

Effet de l'expertise

On note plusieurs effets de l'expertise chez les manutentionnaires hommes : une réduction systématique de la variation inter-essais de l'inclinaison du dos (28 %, $p < 0,01$; tableau 4), des variables d'asymétrie (34-38 %, $p < 0,01$; tableau 4), du positionnement et de l'orientation des pieds (23-39 %, $p < 0,01$; tableau 6) et du bras de résistance (30 %; $p < 0,01$; tableau 6) au soulèvement, peu importe sa masse ou sa hauteur par rapport au sol. La même tendance est observée au dépôt des caisses.

Ces résultats sont en phase avec ceux de Granata et collaborateurs (1999) qui ont observé une diminution de la variation inter-essais des pics de vitesse et d'accélération angulaire du tronc principalement dans le plan frontal (environ 20 % de réduction). Ils n'ont pas rapporté de différence au niveau de la variation inter-essais de l'amplitude de mouvement du dos dans les trois plans de mouvements, bien que les valeurs moyennes rapportées pour les cinq participants expérimentés étaient inférieures à celles des sept autres participants novices (étudiants).

Aucun effet de l'expertise n'a été observé au niveau des mesures liées à la transition, à l'exception de la variation inter-essais de la distance parcourue verticale qui suivait la même tendance que les variables précédentes : plus faible pour les manutentionnaires experts comparativement aux manutentionnaires novices lors des transferts des caisses du convoyeur au diable uniquement (34 %; $p < 0,01$; tableau 8).

Pour plusieurs paramètres de la signature, on observe des indices de dispersion plus faibles chez les manutentionnaires experts hommes comparativement à ceux novices (tableau 9). Cette constance dans les modes opératoires est d'ailleurs notable durant la tâche 'Aller', s'exprimant aussi dans la transition du geste, de même qu'au niveau de la position des pieds, de l'asymétrie et de la position du corps au dépôt des caisses aux différentes hauteurs, qu'elles soient de 15 ou de 23 kg ($p < 0,05$; tableau 9).

Comme l'ont montré Plamondon et collaborateurs (Plamondon, Denis, Bellefeuille, *et al.*, 2010; Plamondon, Denis, Delisle, Larivière et Salazar, 2010), les moments résultants au dos ne sont pas différents entre les experts et les novices. Une seule nuance a été observée, il s'agit d'une interaction significative entre la hauteur et l'expertise (tâche aller) qui indique que les experts ont déployé des chargements externes en asymétrie au dos qui étaient 33 % inférieurs à ceux des manutentionnaires novices lorsque les caisses étaient déposées au sol, alors qu'aucune différence était notée pour les autres hauteurs de dépôt entre ces groupes ($p < 0,05$; tableau 11).

Les variations inter-essais des moments initiaux à L5/S1 (tâche retour) des manutentionnaires hommes experts étaient plus faibles que celles des manutentionnaires novices (en sagittal : 27 % moins élevée, $p < 0,01$, tableau 11; asymétriques : 21 % moins élevée, $p < 0,05$, tableau 11). L'interaction significative entre la Masse et l'Expertise ($p < 0,05$; tableau 12) indique que les impulsions angulaires à L5/S1 en sagittal des manutentionnaires hommes experts étaient plus constants entre les essais que celles des manutentionnaires novices, lorsque les caisses de 23 kg étaient manipulées (22 % moins élevée), alors qu'aucune différence entre les groupes n'était observée pour les caisses de 15 kg (3 % moins élevée). Les mêmes tendances ont été observées pour la tâche aller.

Granata et collaborateurs (1999) ont rapporté que les manutentionnaires expérimentés avaient des moyennes et des variations inter-essais du moment de force en sagittal et en torsion au soulèvement plus élevées que les manutentionnaires novices : en sagittal 266 vs 201 Nm (écart type 32 vs 21 Nm). En valeur absolue, nos résultats indiquent une absence de différence des moments de force en sagittal entre les participants experts et ceux novices, mais un écart type plus faible a été observé chez les experts : en sagittal 227,9 vs 219,6 Nm (écart type 14,8 vs 20,3 Nm; $p < 0,01$). Les résultats diffèrent donc entre nos études. Granata et collaborateurs (1999) ont associé ces différences au fait que les manutentionnaires expérimentés avaient possiblement une plus grande force aux épaules, ce qui leur permettait de tenir la charge à une plus grande distance de leur tronc (bien que cela n'a pas été mesuré). L'étude de Plamondon et collaborateurs (Plamondon, Denis, Delisle, *et al.*, 2010) montre l'effet inverse où la distance horizontale entre les mains et L5/S1 est plus faible au soulèvement chez les manutentionnaires experts. L'explication fournie par Granata et collaborateurs (1999) semble donc peu probable. Il est à noter que la masse corporelle des manutentionnaires expérimentés de l'étude de Granata et collaborateurs (1999) était 9,4 % plus élevées que celles des inexpérimentés, et que les valeurs de moments de force au dos n'étaient pas normalisées en fonction du poids du corps des participants. Certaines études ont montré l'importance du poids du haut du corps dans l'évaluation du moment de force au dos (Corbeil *et al.*, 2019; Hajihosseinali, Arjmand et Shirazi-Adl, 2015). Il est possible que les différences de chargements au dos rapportés dans l'étude de Granata et collaborateurs (1999) entre les groupes soient en partie causées par la différence du poids du haut du corps entre les participants des deux groupes. Il est également possible que les variations observées puissent être le reflet de différents modes opératoires réalisés par les participants experts. Les études ergonomiques publiées par Authier et collaborateurs (Authier *et al.*, 1995; Authier, Gagnon et Lortie, 1996) décrivent la richesse des modes opératoires observés auprès de manutentionnaires experts comparativement aux participants novices, en particulier les diverses façons (plus ou moins fréquentes) que les participants ont opté pour positionner leurs mains sur la caisse au moment du soulèvement, pour se positionner par rapport à la charge (corps et pieds) et pour effectuer le déplacement (transition) des caisses. Le faible nombre de participants experts ($n=5$) de l'étude de Granata et collaborateurs (1999) limite possiblement la capacité de généraliser les résultats observés car le risque d'utiliser un échantillon non représentatif de la population étudiée est plus élevé lorsque l'échantillon est petit. Ces résultats soulignent toutefois l'importance de décrire adéquatement les modes opératoires afin de comprendre les sources de variabilité.

5.4 Discussion

L'objectif de cette première partie de l'analyse était de quantifier les variations intra- et interindividuelles des 65 participants des études antérieures (Corbeil, Plamondon, Teasdale, Handrigan, Ten Have et Manzerolle, 2013; Plamondon, Denis, Bellefeuille, *et al.*, 2010; Plamondon, Denis, *et al.*, 2012). Dix tableaux ont été produits pour présenter l'ensemble des résultats.

L'ajout de contraintes liées à la configuration du contexte a eu un effet sur la diversité des modes opératoires et leurs coûts (c'est-à-dire aux coûts musculosquelettiques évalués par les chargements au dos). L'effet Hauteur, en approchant les charges manutentionnées près du sol, a provoqué trois types d'effets sur les modes opératoires : (1) une diminution de la variabilité motrice liée au positionnement des pieds et à leur orientation, et à l'asymétrie de posture et de charge aux instants de soulèvement et de dépôt; (2) une augmentation de la variabilité motrice des variables posturales dans le plan sagittal et des autres mesures dont leur plage d'opération

a graduellement augmenté au fur et à mesure que les conditions de manipulations étaient près du sol; (3) une diminution de la diversité motrice pour plusieurs paramètres de la signature (telle qu'indiqué par l'indice de dispersion). L'effet Hauteur représente une contrainte dominante qui a donc une influence sur la marge de manœuvre. La manutention de charge près du sol engendre, de manière générale, une réduction de la diversité et de la variabilité des modes opératoires.

Le coût associé à l'ajustement des modes opératoires pour une manutention près du sol se reflète par une hypersollicitation relative des structures musculosquelettiques du bas du dos dans le plan sagittal et une augmentation de la variabilité de ces effets. De manière générale pour l'ensemble des individus testés, les variations des chargements à L5/S1 normalisées que l'on peut observer entre les répétitions d'une même condition ont augmenté au fur et à mesure que les charges manipulées se rapprochaient du sol. Considérant le niveau de sollicitation élevé lorsqu'une charge est manutentionnée près du sol (Corbeil *et al.*, 2019; Harari, Riemer et Bechar, 2019; Hoozemans, Kingma, de Vries et van Dieen, 2008; Lavender, Andersson, Schipplein et Fuentes, 2003; Plamondon, Larivière, *et al.*, 2012), l'augmentation de la variabilité des chargements est possiblement liée à l'augmentation de la variabilité des postures du corps, malgré un positionnement par rapport à la charge qui suit une tendance opposée et qui tend à se stabiliser. L'effet posture exerce un effet dominant sur les chargements au dos (Corbeil *et al.*, 2019; Ghezlbash, Shirazi-Adl, El Ouaid, Plamondon et Arjmand, 2020; Harari, Bechar et Riemer, 2020). De plus, elle sous-entend que la probabilité de dépasser les limites de tolérance des tissus spinaux est plus importante (Granata *et al.*, 1999), donc que le risque de blessure est encore plus élevé. Les participants ont adopté des modes de transition plus réguliers caractérisés par des configurations posturales initiales et terminales faisant face à la charge manipulée lorsqu'elle était basse comparativement aux hauteurs plus éloignées du sol. Cela a clairement été profitable à réduire les chargements au dos en asymétrie et ses variations intra-individuelles.

L'effet Masse est particulièrement percutant. L'augmentation de la masse a entraîné pour la quasi-majorité des modes opératoires une diminution de la variabilité motrice et de la diversité motrice, peu importe la hauteur de manipulation de la charge (à l'exception du marqueur de fluidité dont la variabilité a augmenté). De plus, l'effet Masse a engendré une augmentation nette de la sollicitation relative des structures musculosquelettiques du bas du dos et de ses variations. Alors qu'il est bien connu que la manutention de charge plus lourde engendre une augmentation des chargements au dos (Buseck, Schipplein, Andersson et Andriacchi, 1988; Lavender, Li, Andersson et Natarajan, 1999, et plusieurs autres études post 2000; Schipplein, Reinsel, Andersson et Lavender, 1995), l'augmentation de la variabilité des chargements au dos n'avait été rapportée que pour une tâche discrète impliquant un soulèvement de charge (Granata *et al.*, 1999). Le croisement de ces deux facteurs (Hauteur et Masse) ne semble pas conduire à une exacerbation des effets observés pour chacune des contraintes (non-linéarité), mais plutôt à une addition des effets.

En présence de ces deux facteurs, le coût associé à l'exécution de ces modes opératoires de manière globale est substantiellement majoré par rapport à une condition considérée optimale (hauteur de saisi à une hauteur de la taille et masse à soulever moins lourde). Cette majoration des coûts peut exposer un travailleur à davantage de risque de blessures. Théoriquement, l'exposition à des contraintes, telles qu'une manipulation près du sol ou d'une masse lourde, n'implique pas nécessairement qu'il y ait moins de possibilités (modes opératoires) pour manutentionner la charge dans ces conditions. D'autres contraintes, telles que la restriction d'espace physique, ont possiblement plus d'impact sur le nombre de solutions possibles, car cela peut physiquement empêcher l'exécution de certains mouvements. Le nombre total de solutions

possibles devrait demeurer élevé même en présence de contraintes de Hauteur et de Masse. Néanmoins, force est de constater que les choix des manutentionnaires pointent vers des solutions plus similaires (donc plus fréquentes) et moins variables. En d'autres mots, rien n'empêcherait les manutentionnaires d'adopter un mode de transition plus direct avec une charge lourde au sol, mais la tendance générale de nos données indique qu'il est **peu probable** de l'observer. Cette probabilité plus faible d'observer certains modes opératoires devrait en théorie être liée aux exigences de production. Par exemple, une cadence élevée imposée par une chaîne de production exigerait une solution adaptée, éliminant d'emblée certaines solutions caractérisées par des patrons de mouvement trop lents. Dans le cadre expérimental des études antérieures (Corbeil, Plamondon, Teasdale, Handrigan, Ten Have et Manzerolle, 2013; Plamondon, Denis, Bellefeuille, *et al.*, 2010; Plamondon, Denis, *et al.*, 2012), les exigences de production n'étaient pas restrictives : empiler quatre caisses au rythme qui leur convenait. Il n'y avait pas d'exigence particulière en termes de contrainte de temps, de tonnage quotidien à respecter ou de qualité du travail (p. ex. qualité d'un empilement lors d'une palettisation). Nos résultats ne peuvent donc pas être expliqués par les critères de production, et par ailleurs, ni par les ressources externes puisqu'ils n'y en avaient pas. L'accent est plutôt mis sur la case « ressources internes » du cadre conceptuel de la marge de manœuvre.

Quelles sont ces ressources internes au juste? Ces ressources englobent des aspects cognitifs, socio-affectifs et moteurs : les habitudes des travailleurs, leur préférence, leur logique d'action, leur sentiment d'efficacité personnelle, leur désir de plaire (ou l'importance accordée au jugement des autres), leur désir de performance, leur anthropométrie et leurs aptitudes et habiletés perceptivo-motrices (St-Vincent *et al.*, 2011). Elles incluent les caractéristiques de l'expérience développée par les différents participants : l'expérience professionnelle, celle liée à la tâche et aux systèmes avec lesquels ils interagissent, celle acquise sur d'autres postes de travail, celle branchée sur le travail des autres et sur l'expérience collective, de même que l'expérience de vie qui est branchée à la connaissance de soi (ses atouts et ses limites) (Chassaing, 2004). Des comparaisons entre les groupes ont été effectuées sur les paramètres de diversité/variabilité motrice afin de déterminer l'effet Genre/Sexe, l'effet Surplus de poids et l'effet Expertise et ses interactions avec les conditions répétées par les participants. De manière globale, les experts hommes, ceux en surplus de poids et les manutentionnaires femmes se sont distingués de leurs comparses en adoptant des mouvements moins variables. Seuls les experts ont démontré une sélection de modes opératoires plus constants que les participants hommes novices. Certaines tendances assez fortes ressortent donc de groupes formés *a priori*. On retrouve les effets Masse et les effets Hauteur pour chacun des groupes. Ainsi, les manutentionnaires privilégient en situation de contraintes des solutions qu'ils exécutent de façon moins variable. Pour les experts, ils choisissent des solutions similaires (donc plus fréquentes). Les 'autres' solutions motrices semblent **moins probables** d'être observées pour ces groupes. La diminution de la variabilité intra-individuelle indique une plus grande constance dans le patron de mouvement, mais pour les manutentionnaires experts, on ne peut dire si c'est dû à une diversité motrice plus faible ou à un contrôle moteur plus régulier des principaux modes opératoires.

Le constat final de cette première série d'analyse semble pointer dans une direction. Les possibilités d'actions, ou modes opératoires, semblent plus limitées dans un contexte de travail caractérisé par la présence de contraintes dominantes du fait des ressources internes. Pour les situations expérimentales testées, les multiples solutions motrices demeurent possibles en présence de fortes contraintes liées à la masse de l'objet à déplacer et la hauteur de manutention, mais une sélection plus limitée de solutions semble être privilégiée par nos ressources internes. Les manutentionnaires experts se démarquent davantage des manutentionnaires novices par

une diversité motrice plus faible. De la sorte, en situation de contraintes, la probabilité de sélectionner certaines solutions augmenterait substantiellement, écartant du coup d'autres solutions moins probables. Selon Coutarel et collaborateurs, l'augmentation des marges de manœuvre serait un élément primordial à la prévention des TMS (2015). Il serait peut-être plus juste de mentionner que le retrait des contraintes est un pas pour la prévention. Dans cette situation (retrait des contraintes), l'exposition physique et ses variations mettent moins à risque, ou plutôt, la probabilité est plus faible de mettre à risque le manutentionnaire dans des conditions d'exécution plus optimales pour sa santé. Il y a cependant un 'mais' à cet énoncé qui prend racine au niveau des ressources internes : 'mais' cela dépend des modes opératoires utilisés pour réaliser la tâche selon les prédispositions biopsychosociales de l'individu. Parmi l'ensemble des solutions motrices pour accomplir une tâche (à fort ou à faible risque), il y a toujours la possibilité qu'un travailleur puisse exécuter un mode opératoire à fort coût, par exemple qui occasionnerait un niveau très élevé de sollicitations mécaniques au dos. S'ajoute à cela le fait que chaque solution n'aboutit pas aux mêmes résultats. Des fluctuations ou de la variabilité sont présentes à tous les niveaux de contrôle du geste. Ainsi, la marge de manœuvre s'apparente à une loi de probabilité conditionnelle, à la différence qu'elle ne semble pas régie par le hasard, mais plutôt régulée par des processus d'organisation ou d'auto-organisation adaptatifs.

Dans cet absolu de possibilité d'actions, il faut reconnaître qu'il y a des modes opératoires plus performants que d'autres et d'autres qui sont moins sécuritaires lorsqu'on considère les coûts musculosquelettiques évalués par les chargements au dos. Reconnaisant aussi la présence de différences interindividuelles au sein même de nos groupes, un passage vers une analyse individuelle est de mise. Le prochain chapitre s'intéressera à identifier les modes opératoires individuels les plus performants selon ces mêmes critères biomécaniques en fonction des différents contextes de manutention.

6. DEUXIÈME PARTIE – IMPACT DE LA SIGNATURE GESTUELLE SUR LES CHARGEMENTS AU DOS

6.1 Introduction

Les objectifs de cette seconde partie sont de documenter les modes opératoires les plus fréquents et leurs variations en fonction du contexte de travail, et d'identifier leurs coûts musculosquelettiques évalués par les chargements au dos.

6.2 Méthodologie

L'ensemble des détails méthodologiques est décrit dans le chapitre quatre.

6.2.1 Analyse statistique

Dans cette analyse, toutes les observations (les essais avec des caisses de 15 kg seulement) sont considérées, et chacune d'elle compte pour un échantillon indépendant, car le but de l'analyse est de comparer les chargements au dos entre les modes opératoires les plus fréquents.

Des analyses de variance (ANOVA) à un facteur ont été réalisées pour comparer les moyennes des moments de forces L5/S1 en sagittal et en asymétrie, les impulsions angulaires à L5/S1 en sagittal et en asymétrie, et la durée du transfert entre les catégories de certains paramètres de la signature (Position des pieds, Posture du corps et Asymétrie) et de certaines combinaisons de catégories de la signature les plus fréquentes (critère établi à plus de 50 observations). Le nombre de catégories du paramètre Asymétrie a été réduit à deux : Charge centrée, Charge asymétrique. Le niveau de signification a été établi à 0,05. Un test de Bonferroni pour les comparaisons multiples a été effectué pour déterminer quelles paires de moyennes des groupes étaient significativement différentes l'une de l'autre. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Matlab® (R2019b, The MathWork).

6.3 Résultats – Signature gestuelle

Il existe un lien très fort entre certains paramètres de la signature gestuelle ou certaines combinaisons de paramètres de la signature gestuelle et les chargements externes au dos. Chaque situation spécifique de manutention est revue dans le fin détail dans les sous-sections qui suivent.

Soulèvement d'une charge de 15 kg à partir du sol vers le convoyeur

Une analyse des trois principales combinaisons de paramètres (mode opératoire) observées durant le soulèvement d'une charge de 15 kg à partir du sol suit, et s'appuie sur la figure 3 et le tableau 13.

Position « Demi-squat – Pieds-Face – Charge Centrée » ou De-PF-Ce (soulèvement du sol - H1) :

- Le mode opératoire le plus fréquemment observé (46 %; tableau 13) auprès de 52 participants;

- Moment de force L5/S1 en sagittal est parmi ceux les plus élevés à cet instant;
- Moment de force L5/S1 asymétrique est faible et inférieur en comparaison aux autres modes opératoires avec une asymétrie de charge au soulèvement ($p < 0,05$);
- Impulsion angulaire L5/S1 en sagittal et asymétrique sont parmi les plus élevés de l'ensemble des modes opératoires fréquents (vs De-PD-As, $p < 0,001$).
- La Durée du transfert associée à ce mode opératoire est intermédiaire, notamment plus rapide que la Durée du transfert du mode opératoire « Position Squat – Pieds-Face – Charge Centrée » ($p < 0,001$).

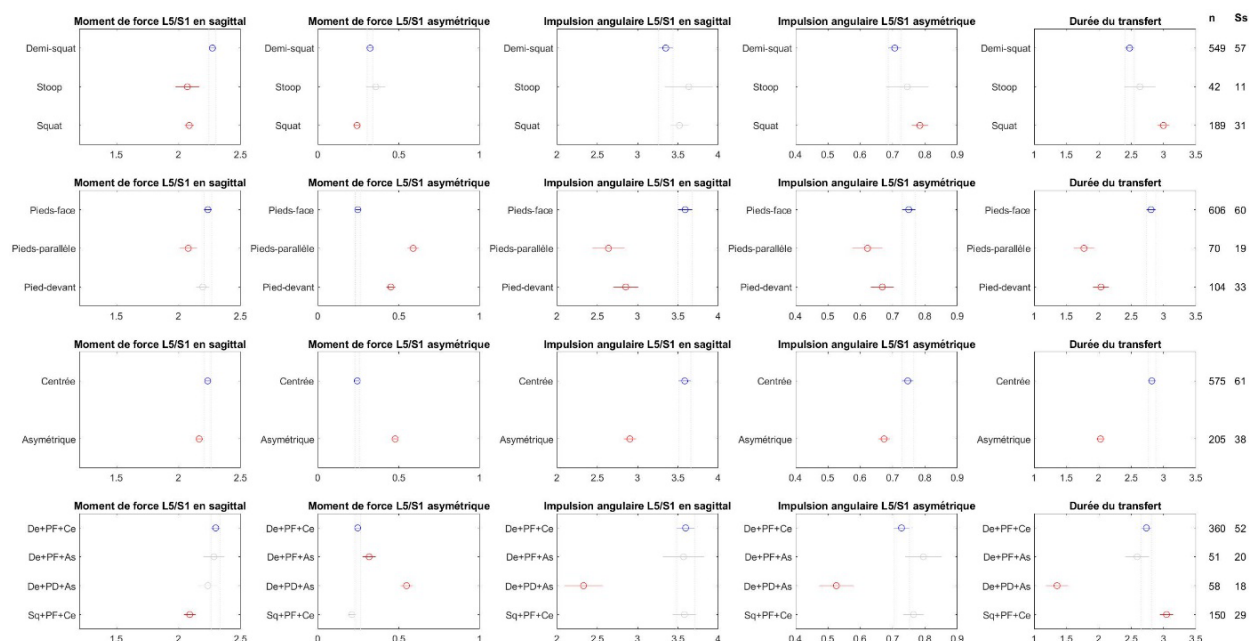


Figure 3. Comparaison des moyennes des différentes catégories ou combinaisons de catégories de trois paramètres de la signature gestuelle de la tâche du diable au convoyeur (retour) – Soulèvement d'une caisse de 15 kg du sol (H1) : posture du corps (soulèvement), position des pieds (soulèvement) et asymétrie de charge (soulèvement).

Note : Chaque point des graphiques représente la moyenne des mesures pour les différentes catégories ou combinaisons de catégories de la signature gestuelle obtenues auprès de n observations impliquant Ss participants (n et Ss sont affichés à la droite de la figure). Chaque point (moyenne) est accompagné d'un intervalle illustré par un trait horizontal. Pour chaque graphique, les intervalles de comparaison des différentes moyennes qui ne se chevauchent pas indiquent que les moyennes des groupes sont significativement différentes les unes des autres (en bleu, sélection automatique de la première catégorie; en rouge, les autres catégories qui sont différentes de celle en bleu; en gris, absence de différence avec la première catégorie). Unités de mesure : Moments de force L5/S1 [Nm/Nm], Impulsion angulaire L5/S1 [Nm·s/Nm], Durée du transfert [s]. n : Nombre d'observations; Ss : Nombre de sujets. De : Demi-squat; St : 'Stoop'; Sq : Squat; PF : Pieds-face; PD : Pied-devant; PP : Pieds-parallèle; Ce : Centrée; As : Asymétrique. Notez que le paramètre asymétrie a été simplifié à deux catégories (sans [Centrée] ou avec une asymétrie de charge [Asymétrique]).

Position Squat – Pieds-Face– Charge Centrée » ou Sq-PF-Ce (soulèvement du sol - H1) :

- 2^e mode opératoire le plus fréquemment observé (19%; Tableau 13); 29 des 65 participants ont exécuté ce mode opératoire au moins une fois;
- Moment de force L5/S1 en sagittal est le plus faible à cet instant en comparaison aux autres modes opératoires fréquents (vs les autres, $p<0.05$);
- Moment de force L5/S1 asymétrique est le plus faible à cet instant en comparaison aux autres modes opératoires fréquents (vs De-PF-Ce, $p=0.08$; vs les autres sauf De-PF-Ce, $p<0.001$);
- Impulsion angulaire L5/S1 en sagittal et asymétrique, et Durée du transfert les plus élevées de l'ensemble des modes opératoires fréquents.

Position Demi-squat – Pied-Devant – Charge Asymétrique » ou De-PD-As (soulèvement du sol - H1) :

- 3^e mode opératoire le plus fréquent (7 %; tableau 13) et observé auprès de 18 participants seulement;
- Moment de force L5/S1 en sagittal est parmi ceux les plus élevés à cet instant;
- Moment de force L5/S1 asymétrique est le plus élevé à cet instant de l'ensemble des modes opératoires fréquents (vs les autres, $p<0,001$);
- Impulsion angulaire L5/S1 en sagittal et asymétrique, et une Durée du transfert les plus faibles parmi l'ensemble des modes opératoires fréquents (vs les autres, $p<0,001$).

De façon sommaire à partir du sol (H1), la position squat (figure 3), qui est peu observée relativement à la position demi-squat (24 vs 70 % des essais; tableau 13), est associée aux plus faibles valeurs de moment de force L5/S1 en sagittal (vs De, $p<0,001$) et asymétrique (vs les autres, $p<0,01$), et aux valeurs parmi les plus élevées d'impulsion angulaire L5/S1 asymétrique (vs De, $p<0,01$), notamment à cause d'une durée du transfert plus importante (vs les autres, $p<0,05$).

Les modes opératoires avec une position des pieds faisant face à la caisse à soulever (figure 3) sont les plus fréquents (78 % des essais; tableau 13) et sont associés aux moments de force L5/S1 les plus élevés en sagittal (vs PD, $p<0,001$) et les plus faibles en asymétrique (vs les autres, $p<0,001$), et aux impulsions angulaires à L5/S1 les plus élevés ($p<0,01$). Les modes opératoires avec une position des pieds à mi-chemin entre le lieu de prise et de dépôt (en parallèle; figure 3) sont associés aux moments de force L5/S1 les plus faibles en sagittal (vs PF, $p<0,001$; vs PD, $p=0,07$), les plus élevés en asymétrie (vs les autres, $p<0,001$), aux impulsions angulaires les plus faibles (vs PF, $p<0,001$) et aux durées de transfert les plus rapides (vs PF, $p<0,001$; vs PD, $p=0,07$). Les modes opératoires avec la position un pied devant (figure 3) sont associés à moins d'asymétrie que la position pieds parallèle, plus d'effort au soulèvement en sagittal, et légèrement plus de cumul que les modes opératoires avec une position des pieds en parallèle. Comparativement aux modes opératoires avec la charge centrée au corps, ceux avec une asymétrie de charge (26 % des essais; tableau 13 et figure 3) sont associés à des moments de

force L5/S1 en sagittal plus faibles ($p < 0,05$), plus d'asymétrie ($p < 0,001$), et des cumuls et des temps de transferts nettement plus faibles ($p < 0,001$).

Tableau 13. Tableau comparatif des principales combinaisons de paramètres de la signature gestuelle pour les soulèvements et les dépôts aux quatre hauteurs (H1 à H4) sur le diable

Modes opératoires			H1				H2				H3				H4				
			S	A	C	F	S	A	C	F	S	A	C	F	S	A	C	F	
Soulèvement	De	PF	Ce				46%				33%				22%				8%
	De	PF	As				7%												
	De	PD	As				7%				7%				8%				
	Sq	PF	Ce	-			19%	-			11%				8%	-		+	18%
	De	PP	As								17%				39%	+			29%
	St	PP	As								9%								
	Sq	PP	As														+		16%
Dépôt	De	PF	Ce				50%				30%				23%				11%
	St	PF	Ce				9%	+			22%				11%				
	Sq	PF	Ce		-		15%												7%
	St	PD	As								9%								
	St	PP	As								10%				7%				
	De	PD	As												11%				
	De	PD	Ce										-		11%				
	De	PP	As										-		8%				
	Ne	PF	As																7%
	Ne	PF	Ce																31%
	Ne	PD	Ce																10%

Niveau de sollicitation des structures musculo-squelettiques du bas du dos pour S, A et C

S	<1.0	$1.0 < S < 1.5$	$1.5 < S < 2$	>2
A	<0.25	$0.25 < A < 0.5$	$0.5 < A < 0.75$	>0.75
C	<2.5	$2.5 < C < 3.0$	$3.0 < C < 3.5$	>3.5

Note : Les trois paramètres (modes opératoires) sont dans l'ordre : 1) la 'Posture du corps' (De : Demi-squat; Sq : Squat; St : 'Stoop'; Ne : Neutre), 2) la 'Position des pieds' (PF : Pieds-Face; PD : un Pied Devant; PP : Pieds-Parallèle) et 3) l'Asymétrie de charge (As : Asymétrie de charge; Ce : charge Centrée). La couleur indique le niveau de risque associé au moment de force à L5/S1 en sagittal (colonne **S**) [Nm/Nm], le moment de force résultant à L5/S1 asymétrique (colonne **A**) [Nm/Nm] et l'impulsion angulaire à L5/S1 en sagittal (Cumul, colonne **C**) [Nm·s/Nm]. H = hauteur (H1 = au sol; H2 = hauteur intermédiaire basse; H3 = hauteur intermédiaire haute; H4 = hauteur haute). Les seuils des différents niveaux de sollicitation des structures musculosquelettiques du bas du dos ont été déterminés arbitrairement afin de faciliter l'analyse des résultats. Les faibles niveaux de sollicitation sont indiqués en vert, alors que ceux les plus élevés sont indiqués en rouge. Les couleurs jaune et orange sont utilisées pour les niveaux de sollicitation intermédiaires. La fréquence relative de ces combinaisons est indiquée dans la colonne **F**. Ce sont les modes opératoires les plus fréquemment observés (≥ 50). Les modes opératoires présentés dans le tableau incluent 73 % de l'ensemble des essais (4566/6240 transferts de caisses de 15 kg). Notez que les combinaisons ont été déterminées à l'instant du soulèvement de la caisse de 15 kg, ou à son dépôt. Le mode opératoire à cet instant a été associé aux moments de force au dos à ce même instant et au cumul des chargements générés à partir de cet instant et pour la durée de la mise sous charge. Les symboles + et - témoignent de la comparaison des effets pour les combinaisons de paramètres d'un même niveau de risque : - indique que la valeur observée pour un mode opératoire est significativement plus faible que les autres valeurs; + indique que la valeur observée pour un mode opératoire est significativement plus élevée que les autres valeurs. Les cases vides et sans couleur indiquent que ce mode opératoire a été observé ou pas dans moins de <1 % des essais.

Soulèvement d'une charge de 15 kg à partir de la hauteur intermédiaire basse (à 32 cm de hauteur du sol – H2) vers le convoyeur

Comparativement à la condition précédente (soulèvement à partir du sol), ce que l'on note est le plus grand nombre de modes opératoires et la fréquence relativement plus faibles des modes les plus fréquents (figure 4 et tableau 13).

Le mode opératoire le plus sécuritaire en termes de moments de force L5/S1 à l'instant du soulèvement (H2) demeure « Position Squat – Pieds-Face – Charge Centrée » ou Sq-PF-Ce. La Durée du transfert est la plus élevée parmi les autres modes opératoires fréquents (vs tous sauf De-PF-Ce, $p < 0,001$). Mais les impulsions angulaires à L5/S1 se situent en milieu de peloton. À noter que sa fréquence d'utilisation est plus faible qu'en H1 (11 %; tableau 13), et ce mode se situe maintenant au 3^e rang des modes opératoires les plus fréquents.

Le mode opératoire qui permet de cumuler le moins de chargement demeure « Position Demi-squat – Pied-Devant – Asymétrie de charge » ou De-PD-As. Sa fréquence d'utilisation est demeurée constante par rapport à H1 (7 %; tableau 13), et ce mode opératoire se situe au 5^e rang selon sa fréquence d'observation.

Deux nouveaux modes opératoires se sont ajoutés (comptant pour 26 % des essais; tableau 13), intégrant une position des pieds en parallèle et une asymétrie de charge. Ces modes opératoires sont caractérisés par des chargements externes à L5/S1 en asymétrie importants, des durées de transferts relativement rapides, et des cumuls d'effort intermédiaires.

Globalement, en analysant les effets principaux, on note :

- La position squat (14 % des essais; tableau 13) est celle qui engendre le moins de chargements au dos à l'instant du soulèvement à H2 (vs les autres, $p < 0,001$); et bien que ce mode opératoire soit associé à des durées de transfert plus important, il n'engendre pas de coût supplémentaire au niveau du cumul des efforts.
- Les modes opératoires qui incluent la position pieds en face (55 % des essais; tableau 13) sont associés à des moments de force L5/S1 asymétriques minimaux (vs les autres, $p < 0,001$), mais avaient des durées de transfert plus élevés (vs les autres, $p < 0,001$) et des cumuls d'effort plus importants (vs les autres, $p < 0,05$).
- Les modes opératoires qui incluent une position de charge asymétrique au soulèvement sont plus fréquents qu'en H1 (43 % versus 26 % des essais; tableau 13), et sont associés à des moments de force L5/S1 asymétriques nettement plus importants ($p < 0,001$), à des transitions plus rapides (800ms plus rapide, $p < 0,001$) et des cumuls nettement plus faibles ($p < 0,05$).

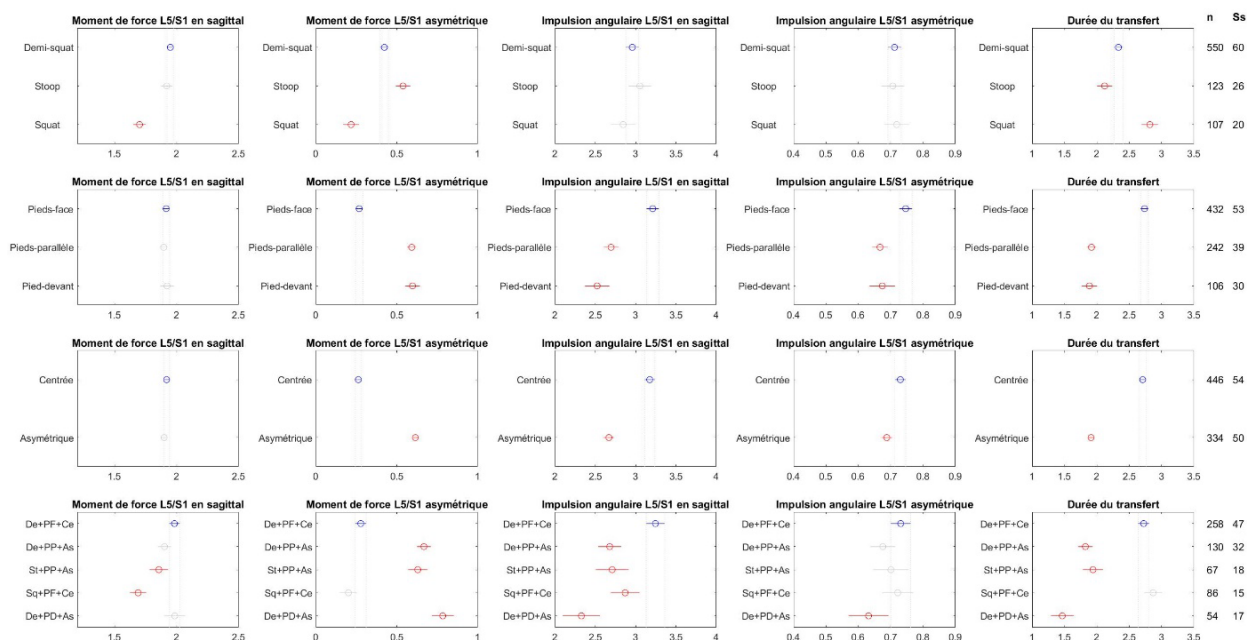


Figure 4. Comparaison des moyennes des différentes catégories ou combinaisons de catégories de trois paramètres de la signature gestuelle de la tâche du diable au convoyeur (retour) – Soulèvement d’une caisse de 15 kg d’une hauteur intermédiaire basse (H2).

Pour les explications détaillées de la figure, veuillez-vous référer à la figure 3.

Soulèvement d’une charge de 15 kg à partir de hauteur intermédiaire haute (H3) et haute (H4) vers le convoyeur

Les modes opératoires en asymétrie de charge occupent une place encore plus prédominante pour les soulèvements à H3 et H4 (figure 16 et figure 17 à l’annexe B et tableau 13); le pourcentage d’essais en asymétrie de charge passe de 43 % (H2) à 59 et 61 % pour les essais à H3 et H4, le pourcentage d’essais avec une position des pieds en parallèle grimpe de 31 % (H2) à 47 et 58 %, respectivement.

Le mode opératoire le plus sécuritaire en termes de moments de force L5/S1 à l’instant du soulèvement s’avère encore « Position Squat – Pieds-Face – Charge Centrée » (Sq-PF-Ce). Un mode opératoire similaire « Position Demi-squat – Pieds-Face – Charge Centrée » (De-PF-Ce) est presque trois fois plus fréquentes à H3 et contraste en termes de coûts : pour une Durée du transfert équivalente, la position en demi-squat est associée à des moments de force L5/S1 en sagittal et des impulsions angulaires en sagittal plus important que la position squat.

Parmi les modes opératoires qui permettent de cumuler le moins de chargement, on retrouve le mode sécuritaire (Sq-PF-Ce) et deux autres modes opératoires intégrant des positions en asymétrie de charge avec une position des pieds en parallèle et un pied devant l’autre.

Dépôt au sol d'une charge de 15 kg en provenance du convoyeur

Les trois principales combinaisons de paramètres (modes opératoires) observées lors du dépôt au sol d'une charge de 15 kg en provenance du convoyeur totalisent 74 % de tous les essais (figure 5 et tableau 13).

Position Demi-squat – Pieds-Face – Charge Centrée » ou De-PF-Ce (au dépôt) :

- Le mode opératoire le plus fréquemment observé (50 %; tableau 13); observé auprès de 54 participants;
- Moment de force L5/S1 en sagittal est parmi ceux les plus élevés à cet instant;
- Moment de force L5/S1 asymétrique intermédiaire comparativement aux autres modes opératoires fréquents;
- Impulsion angulaire L5/S1 en sagittal et asymétrique sont parmi ceux les plus élevés à cet instant.

Position Squat – Pieds-Face – Charge Centrée » ou Sq-PF-Ce (au dépôt au sol – H1) :

- 2^e mode opératoire le plus fréquemment observé (15 %; tableau 13); 20 des 65 participants ont exécuté ce mode opératoire au moins une fois;
- Moment de force L5/S1 en sagittal le plus faible à cet instant de l'ensemble des modes opératoires fréquents (vs les autres, $p < 0,001$);
- Moment de force L5/S1 asymétrique est le plus faible à cet instant en comparaison aux autres modes opératoires fréquents (vs les autres, $p < 0,001$);
- Impulsion angulaire L5/S1 en sagittal et asymétrique les plus faibles (vs De-PF-Ce, $p < 0,05$; vs St-PF-Ce, $p = 0,09$) malgré une Durée du transfert plus élevée que les autres modes opératoires (vs les autres, $p < 0,05$).

Position Stoop – Pieds-Face – Charge Centrée » ou St-PF-Ce (au dépôt) :

- 3^e mode opératoire le plus fréquent (9 %; tableau 13), et observé auprès de 20 participants;
- Moment de force L5/S1 en sagittal est parmi ceux les plus élevés à cet instant;
- Moment de force L5/S1 asymétrique est le plus élevé à cet instant ($p < 0,01$);
- Impulsion angulaire L5/S1 en sagittal et asymétrique sont parmi ceux les plus élevés à cet instant.

Sommairement, on note ces observations :

La position squat (figure 5) qui est peu observée relativement à position demi-squat (18 vs 61 % des essais; tableau 13), est associée aux moments de force L5/S1 en sagittal et asymétrique les plus faibles (vs les autres, $p < 0,001$). Les valeurs d'impulsion angulaire L5/S1 en sagittal et asymétrique sont relativement équivalents aux autres modes opératoires, notamment à cause d'une Durée du transfert la plus élevée ($p < 0,001$). Les modes opératoires avec une position du corps en 'Stoop (figure 5) sont associés à des moments de force L5/S1 asymétriques les plus élevés parmi les autres catégories ($p < 0,001$), à de courtes durées de transfert ($p < 0,001$) et à des cumuls d'effort à L5/S1 parmi les plus faibles (vs De, $p < 0,001$).

Les modes opératoires avec une position des pieds faisant face à la caisse à soulever (figure 5) sont plus fréquents (83 % des essais; tableau 13) que ceux avec la position un pied devant (12 %; tableau 13) et sont associés aux moments de force L5/S1 asymétriques les plus faibles (vs les autres, $p < 0,001$), et aux impulsions angulaires à L5/S1 parmi les plus élevés (vs PD, $p < 0,001$).

Comparativement aux modes opératoires avec la charge centrée au corps, ceux avec une charge asymétrique (22 % des essais; tableau 13 et figure 5) sont associés à des moments de force L5/S1 en sagittal plus faibles ($p < 0,001$), plus d'asymétrie ($p < 0,001$), et des cumuls d'efforts en sagittal et des temps de transferts nettement plus faibles ($p < 0,001$).

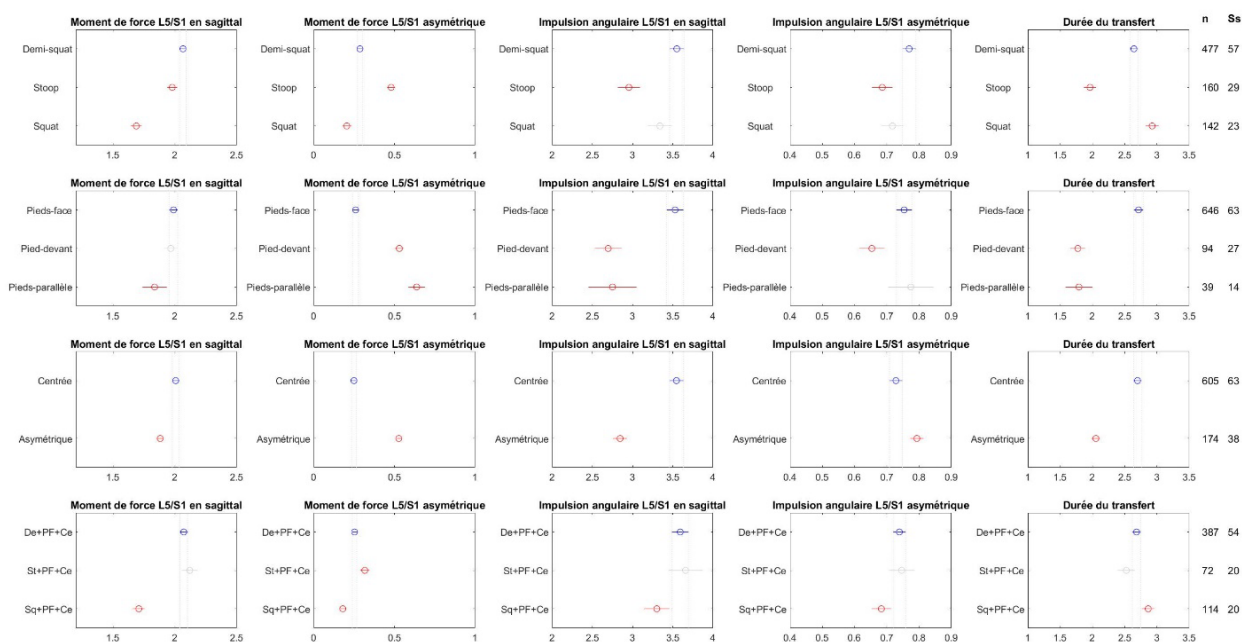


Figure 5. Comparaison des moyennes des différentes catégories ou combinaisons de catégories de trois paramètres de la signature gestuelle de la tâche du convoyeur au diable (aller) – Dépôt d'une caisse de 15 kg au sol (H1).

Pour les explications détaillées de la figure, veuillez-vous référer à la figure 3.

Dépôt d'une charge de 15 kg à une hauteur intermédiaire basse (H2) en provenance du convoyeur.

Comparativement à la condition précédente (dépôt au sol), le plus grand changement concerne l'augmentation de la fréquence des modes opératoires avec une position du corps en 'Stoop' (H1 : 21 % vs H2 : 49 %; tableau 13 et figure 6). Peu de manutentionnaires (n=9) ont adopté des modes opératoires avec une position en squat (<4 %; tableau 13), bien que cela s'avère l'option qui est associée aux moments de force L5/S1 les plus faibles ($p < 0,001$).

Globalement, on se trouve à observer deux familles de modes opératoires, soit celle associée aux modes opératoires caractérisés par une charge centrée au corps et ceux avec une charge excentrée. Leurs distinctions se situent principalement à trois niveaux : (1) en fréquence, parmi les modes opératoires les plus fréquents, il y a beaucoup plus de dépôts réalisés avec la charge centrée au corps; (2) en effort asymétrique, les moments de forces L5/S1 asymétriques sont plus faibles pour les modes opératoires avec la charge centrée ($p < 0,001$; figure 6); (3) en termes de cumuls, les durées de transferts rapides (courtes durées) sont davantage associées aux modes opératoires marqués par une asymétrie, ce qui se reflète nettement au niveau des impulsions angulaires en sagittal qui étaient plus faibles ($p < 0,001$; figure 6).

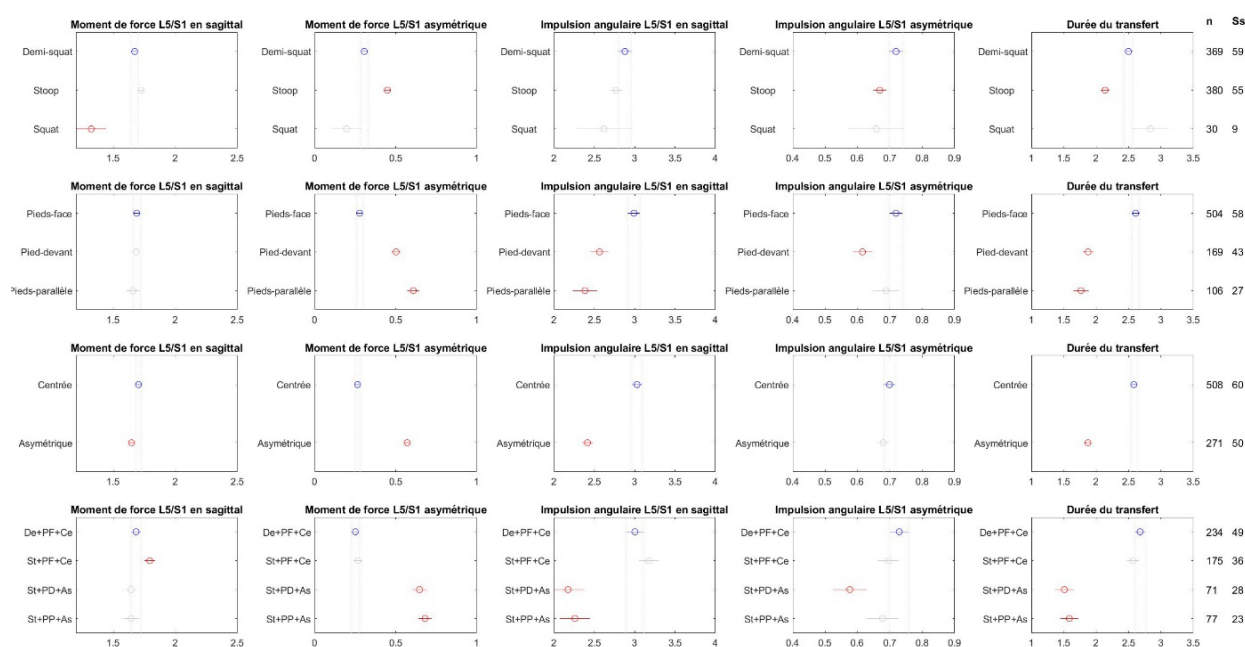


Figure 6. Comparaison des moyennes des différentes catégories ou combinaisons de catégories de trois paramètres de la signature gestuelle de la tâche du convoyeur au diable (aller) – Dépôt d'une caisse de 15 kg à une hauteur intermédiaire basse (H2).

Pour les explications détaillées de la figure, veuillez-vous référer à la figure 3.

Dépôt d'une charge de 15 kg à des hauteurs intermédiaires haute (H3) et haute (H4) en provenance du convoyeur

On observe une très grande variabilité des modes opératoires lors du dépôt aux hauteurs H3 et H4 (figure 18 et figure 19 à l'annexe B et le tableau 13). Bien que, de manière générale, les moments de force à L5/S1 et les impulsions angulaires soient plus faibles que les autres conditions de dépôt, quelques tendances ont été notées.

Les positions en squat et neutres sont associées à des moments de force à L5/S1 et des impulsions angulaires en sagittal plus faibles que les autres positions du corps bien qu'ils aient été peu fréquemment utilisés.

L'adoption d'une position en asymétrie et/ou d'une position des pieds décalée (un pied devant) ou en parallèle, est associée à une augmentation des moments de force L5/S1 en sagittal et asymétriques, à des temps de transferts plus courts et des cumuls en sagittal plus faibles.

6.4 Discussion

Au soulèvement, sept combinaisons de paramètres ont été observées à plus de 50 reprises. Deux combinaisons ressortent du lot, soit la position demi-squat ou squat avec les pieds faisant face à la charge et la charge centrée par rapport au corps (De-PF-Ce & Sq-PF-Ce). Ces combinaisons sont particulièrement prévalentes pour les hauteurs de soulèvement basses. Cette diversité motrice ne doit pas être confondue avec la variabilité motrice présentée dans le chapitre précédent. Une variabilité motrice représente aussi un trait individuel et caractérise la répétition de chacun des modes opératoires et chaque mouvement produit.

Squat versus 'Stoop' : le point final?

Les résultats de cette seconde partie indiquent que la posture du corps en squat au moment du soulèvement, peu importe la hauteur, a été associée aux plus faibles moments de force à L5/S1 en sagittal comparativement aux autres postures du corps. Par ailleurs, on retrouve une seule des sept combinaisons impliquant une posture du corps en 'Stoop', et elle a été observée uniquement à une hauteur intermédiaire basse (H2) au soulèvement. Ce mode a principalement été observé en combinaison avec les pieds en position parallèle et la charge décentrée au corps (St-PP-As). Cette position est normalement adoptée afin de faciliter la transition de la charge en mode direct. La posture du corps en 'Stoop' est beaucoup plus fréquente à la fin des transferts de charge au moment du dépôt.

Jusqu'à récemment, la littérature scientifique était peu concluante sur la technique à adopter pour réduire les chargements lombaires lors d'un soulèvement de charge, car certains ont rapporté des chargements au dos plus petits durant des soulèvements de charge en position squat comparativement à une posture du corps en 'Stoop' (Buseck *et al.*, 1988; Hagen et Harms-Ringdahl, 1994; Potvin, McGill et Norman, 1991) tandis que d'autres ont démontré le contraire (Kingma, Bosch, Bruins et van Dieen, 2004; van Dieen, Creemers, Draisma, Toussaint et Kingma, 1994). De plus, il a été rapporté que de nombreux travailleurs, malgré des instructions contraires, préféraient une posture du corps en 'Stoop' en raison de sa facilité d'exécution et de sa consommation d'énergie réduite lors des tâches de soulèvement répétitives (Garg et Herrin, 1979), notamment pour les charges plus légères (Hagen, Harms-Ringdahl et Hallen, 1994). L'absence d'une justification biomécanique claire pour la promotion de l'un ou l'autre de ces styles expliquait en partie ce débat (McGill, 1997; van Dieen, Hoozemans et Toussaint, 1999). Une

validation biomécanique a été réalisée par Bazrgari et collaborateurs (Bazrgari, Shirazi-Adl et Arjmand, 2007). Ils ont démontré que le soulèvement de charge en adoptant une posture du corps en squat était la technique la plus sûre pour réduire le moment de force résultant au dos, de même que les forces musculaires et les charges ligamentaires internes à tous les niveaux du dos. Ils expliquent que la réduction du moment de force résultant au dos en position squat, dans les cas avec et sans charge externe, est principalement due aux plus faibles rotations du pelvis et aux rotations lombaires, et par le fait même de l'inclinaison du dos par rapport à la verticale, comparativement à une posture du corps en 'Stoop', ce qui se traduisait par des moments de force nets très réduits de la masse du haut du corps et de la charge externe autour de l'articulation L5/S1 (Bazrgari *et al.*, 2007).

Ces résultats soulèvent l'importance des définitions que l'on accorde au squat et au 'Stoop', et ce qui peut être considéré un croisement ou un espace mitoyen entre les deux styles (demi-squat). Burgess-Limerick et Abernethy (1997) ont proposé une définition basée sur un index de soulèvement que nous avons adaptée à nos fins. Pour cette définition, ou une autre, il nous apparaît important de définir convenablement ces styles/techniques en fonction, au minimum, de deux critères : l'angle articulaire au genou et l'inclinaison par rapport à la verticale du dos en référence au 'dos droit et genou fléchi' associé à la technique du squat. Considérant également que ces angles dépendent fortement du contexte de travail (hauteur de soulèvement ou de dépôt), il est important que la classification des postures du corps soit adaptée en conséquence (Burgess-Limerick et Abernethy, 1997). L'interprétation de chaque résultat en provenance de différentes études liées aux techniques de soulèvement devrait prendre en considération ces doubles critères ou autres équivalents; en s'assurant que les résultats attribués au squat soient, selon une définition des techniques de soulèvement appropriées, réellement associées à un mode squat et non à une technique demi-squat (et le même raisonnement s'applique pour le mode en 'Stoop'). Il se peut très bien que des erreurs de classification puissent expliquer certains résultats contradictoires (Kingma *et al.*, 2004). La classification des postures utilisée indique également qu'une augmentation de l'angle au genou entre les conditions ne signifie pas nécessairement que l'individu est plus en mode squat ou une flexion du dos plus importante ne se traduit pas automatiquement par un mode en 'Stoop'. Cela dit, nos résultats montrent clairement les différents avantages entre les différentes techniques de soulèvement. La posture du corps en squat est associée à des moments de force à L5/S1 plus faibles que les autres modes, au soulèvement et au dépôt, peu importe le contexte, ce qui appuie en totalité les conclusions de Bazrgari et collaborateurs (2007). En considérant la position des charges externes en relation avec le positionnement des pieds, ce résultat tient encore la route. D'autres facteurs tels que les modifications volontaires de la courbure lombaire et la vitesse de déplacement de la charge peuvent aussi affecter les chargements lombaires lors d'un soulèvement (ou le dépôt) de charge (Bazrgari *et al.*, 2007), mais ceux-ci n'ont pas été pris en considération dans la présente étude.

Il ne s'agit pas d'un plaidoyer en faveur de la technique 'sécuritaire' pour tous les contextes de travail en manutention, mais d'un détour nécessaire pour clarifier certains aspects, dont la nécessité d'une définition claire de ce qu'est l'une ou l'autre des postures de travail et des effets associés distincts au niveau des moments de force à L5/S1. Maintenant dit, est-ce le point final du débat entre 'Squat' et 'Stoop'? Non, car le débat se doit d'être dirigé vers des aspects plus pratiques. Pour poursuivre ce débat, il s'avère donc nécessaire d'introduire la notion de compromis entre des aspects de performance et de santé liés à la tâche. Ce qui sera développé dans les prochaines sections.

Diversité motrice : les modes de transition plus directs

On observe également des modes opératoires moins fréquents. Ces autres modes opératoires au soulèvement intègrent pour la plupart une composante en asymétrie et un positionnement des pieds qui favorisent davantage un mode de transition plus direct. Par exemple, pour une charge prise au sol, l'adoption d'une posture du corps en demi-squat, un pied devant l'autre et la charge décentrée au corps (De-PD-As) constitue une plateforme posturale initiale favorable à un mode de transition qui minimise la mise sous charge, c'est-à-dire un transfert de la charge plus direct, par conséquent plus rapide, vers le lieu de dépôt. En effet, bien que ce mode opératoire ait été observé peu fréquemment à H1, H2 et H3, il est associé aux impulsions angulaires à L5/S1 en sagittal les plus faibles. En contrepartie, il est aussi associé à des moments de force asymétrique résultants à L5/S1 parmi les plus élevés. Ces résultats mettent en lumière le coût de vouloir déplacer une charge plus rapidement (pour minimiser la mise sous charge) au détriment d'une position relative entre la charge et le corps qui est plus décentrée et qui nécessite de plus grands efforts asymétriques lors du soulèvement de la charge. Fait intéressant à noter, ce choix ne semble pas impliquer dans l'équation du compromis le moment de force à L5/S1 en sagittal qui demeure relativement équivalent entre les différents modes.

Le nombre de combinaisons fréquentes de paramètres ($n \geq 50$) tend à augmenter pour les soulèvements et les dépôts réalisés à partir d'une hauteur qui s'éloigne du sol, par le fait même la fréquence des principaux modes diminue. D'ailleurs, on observe davantage de modes opératoires pour ces hauteurs qui sont favorables à des transitions directes de la charge à déplacer. Par exemple, le mode opératoire caractérisé par une posture du corps en demi-squat, les pieds en parallèle et la charge décentrée au corps (De-PP-As) devient le mode prévalent pour les conditions de soulèvement aux hauteurs intermédiaires et hautes. Ce mode opératoire constitue en quelque sorte un compromis en comparaison au mode précédent (avec un pied devant l'autre) : réajustement à la baisse du niveau d'effort asymétrique (plus près de la charge au soulèvement) et réajustement à la hausse du niveau d'impulsion angulaire à L5/S1 (une durée de mise sous charge légèrement allongée).

Au dépôt de charge à la hauteur intermédiaire basse (H2), deux nouvelles combinaisons de paramètres sont observées : St+PD+As et St+PP+As. Ces modes opératoires sont caractérisés par une posture du corps en 'Stoop' et la charge décentrée par rapport au corps au moment du dépôt, avec la position des pieds un devant l'autre ou en parallèle; typique d'une posture finale d'un mode de transition directe. D'ailleurs, ces deux combinaisons de paramètres se distinguent des deux autres (De+PF+Ce et St+PF+Ce), observés également au dépôt, par des impulsions angulaires à L5/S1 plus faibles et des moments de force asymétriques à L5/S1 plus élevés. La combinaison de paramètres St+PF+Ce, caractérisée par une posture du corps en 'Stoop' et faisant face au lieu de dépôt, se distingue des autres combinaisons par des moments de force au soulèvement et des impulsions angulaires en sagittal plus importants; possiblement un mode opératoire à éviter et à remplacer par un mode opératoire plus sécuritaire.

Dans les travaux de Delisle et collaborateurs (Delisle *et al.*, 1996), deux types de patrons de déplacements des pieds (inspirés de travaux de Authier *et al.*, 1995, 1996) ont été imposés à des participants novices pour déplacer des caisses (tâche de soulèvement et tâche de dépôt impliquant des boîtes de 12 kg, impliquant un format caisse plus volumineux, une distance entre le lieu de soulèvement et de dépôt plus près et des hauteurs de manutention légèrement différentes). Selon notre classification de la position des pieds (au soulèvement), les deux cas simulés dans l'étude seraient associés à la catégorie Pieds-parallèle. Les résultats indiquent une absence de différence au niveau des moments résultants maximaux à L5/S1 entre les patrons de

déplacement des pieds pour les deux tâches. Trois constats peuvent être faits : (1) bien que des analyses ergonomiques aient associé ces positions de pied à un comportement expert (Authier *et al.*, 1995, 1996), il s'agit de modes peu fréquemment adoptés par les participants (experts ou pas) pour les charges manutentionnées au sol; sans remettre en doute la précision des observations ergonomiques, il convient de souligner la complexité de classer par observation la position et le mouvement des pieds lors d'une tâche de manutention (Vallée-Marcotte *et al.*, 2021); (2) pour une même catégorie, on peut retrouver différentes configurations posturales qui se rapprochent les unes des autres soulevant ainsi les limites des méthodes de classification qui visent à réduire le nombre de catégories à l'essentiel; (3) pour une même catégorie, durant la phase de transition, il peut y avoir aussi plusieurs patrons de mouvement qui ont leurs propres caractéristiques opératoires; par exemple, il peut y avoir un mode de transition plus direct et économique tel que l'« Oblique step », ou un mode plus séquentiel par étape nécessitant de plus grands déplacements des pieds tel que le « Crossed step » (Delisle *et al.*, 1996); chacun de ces modes possède des effets distincts sur les structures musculosquelettiques; l'ouverture des pieds et leur orientation vers le lieu de dépôt ouvrent donc la possibilité d'adopter un mode de transition directe. Ces résultats rappellent que notre proposition de classer les modes opératoires possède quelques limitations, dont celle d'imposer un carcan statique à une gestuelle. Il ne faut surtout pas oublier que cette image, ce « *snapshot* » d'un instant, s'intègre dans une gestuelle et différentes variantes peuvent survenir durant la phase de transition. Il s'agit néanmoins d'un repère d'observation intéressant sur lequel nous pouvons bâtir sans trop dénaturer les résultats.

Ces modes de transition sont observés parce que la tâche prescrite est séquentielle et qu'elle nécessite un déplacement du corps et de la charge entre l'instant du soulèvement et celui du dépôt d'une charge. Ces modes sont présents parce qu'il y a une phase de transition significative. Ils ne sont pas observés lorsqu'on s'intéresse uniquement à un soulèvement de charge dont la finalité est de déposer droit devant ou maintenir la charge en position debout érigée. L'étude de Harari et collaborateurs (Harari *et al.*, 2019) démontre que la cinématique du geste et les chargements lombaires sont différents entre une tâche de soulèvement et une tâche séquentielle qui nécessite de transférer une caisse d'un emplacement à un autre.

Sollicitation aux genoux

Bien que l'accent de nos résultats soit mis sur les chargements lombaires, il est important de réaliser que certaines postures impliquant une flexion des genoux peuvent solliciter mécaniquement d'autres articulations. Une étude réalisée en laboratoire comparant les modes opératoires des experts et les novices a documenté le niveau de sollicitation musculosquelettique aux genoux lors d'une tâche de manutention impliquant un soulèvement et un dépôt près du sol (avec très peu ou pas de déplacement possible des pieds lors de la phase de transition). Les chercheurs ont montré que les participants experts réalisaient leur geste en fléchissant moins leurs genoux comparativement aux participants novices (32 vs 55°), leur permettant de réduire les efforts asymétriques aux genoux et le travail mécanique (dépense énergétique) durant la phase de transition (Gagnon *et al.*, 1996). Les moments maximaux en flexion des genoux étaient plus élevés chez les experts et les chargements résultants au dos ne différaient pas entre les groupes. Selon le modèle développé en Annexe A, les moyennes des angles (genoux et dos) des groupes, rapportées dans l'étude de Gagnon et collaborateurs (1996), seraient associées à des postures en demi-squat, bien que les experts se retrouveraient davantage plus près de la limite d'une posture du corps en « Stoop ». Ces résultats démontrent bien la nature pluridimensionnelle du problème de bien caractériser le mode opératoire.

Au dépôt, on observe onze combinaisons de paramètres fréquentes ($n \geq 50$). Trois d'entre elles sont fréquemment adoptées lors des dépôts de charge à la hauteur du sol : **De-PF-Ce**, **St-PF-Ce** et **Sq-PF-Ce**. Ces trois combinaisons ont en commun la position des pieds qui font face au lieu de dépôt et la charge centrée par rapport au corps et se distinguent au niveau de la posture du corps. La posture du corps en demi-squat est la plus fréquemment observée et celle en squat est celle qui se distingue des autres au niveau des plus faibles chargements au dos. Le niveau de sollicitation des genoux pour ces trois postures n'a pas été calculé, ceci constitue une autre limitation de notre étude. Cependant, il est possible de supposer que les chargements aux genoux augmenteraient en fonction de l'angle de flexion des genoux. Si tel était le cas, les combinaisons impliquant un 'Stoop' solliciteraient moins les genoux que celle impliquant un 'Squat'.

L'effet Hauteur agit donc comme un puissant déterminant pouvant parfois limiter les solutions/modes opératoires possibles pour effectuer le soulèvement, par exemple lorsque la charge à soulever ou à déposer est au sol ou à une hauteur intermédiaire basse. Pour une hauteur de manipulation au sol, la posture du corps est généralement centrée et faisant face à la charge lors du soulèvement ou face au lieu de dépôt, limitant ainsi le niveau d'asymétrie. À la hauteur intermédiaire basse, les modes de transition directe deviennent plus fréquents que lors des manipulations de charge au sol, exposant davantage les manutentionnaires à des chargements asymétriques au dos, mais en diminuant la durée de la mise sous charge et donc le cumul des chargements en sagittal au dos. Les chargements aux genoux seraient possiblement aussi allégés.

Notion de compromis

Ces résultats constituent une preuve éloquente de la très grande variété des façons de faire lorsqu'on observe/étudie la manutention dans un cadre d'observation qui se rapproche d'un contexte réel. L'erreur trop souvent commise par les études passées est de juger la valeur des différents modes opératoires en tenant compte d'un nombre limité de dimensions, parfois décontextualisée des exigences et des contraintes que l'on peut observer en milieu réel.

L'exercice mené dans ce chapitre aura permis d'illustrer la complexité d'une simple tâche de manutention lorsqu'elle est analysée sous différents critères de performance et de santé. Le choix du mode opératoire (la régulation de l'activité de travail) en fonction d'un contexte de travail découle d'un compromis, qu'il soit conscient ou non, entre différents aspects de performance, de préférence et de santé, qui sont liés à la tâche. Il ne semble pas exister UN mode opératoire qui puisse répondre à tous ces critères : à la fois répondre aux besoins de production liés à la tâche de manutention et être sécuritaire dans toutes les dimensions que peuvent prendre les risques à la santé. Il serait utopique de penser qu'une telle solution puisse également être atteignable. L'idée est plutôt d'optimiser. Les résultats suggèrent qu'en adoptant certains modes opératoires, on peut diminuer ceci au détriment de cela. Le nombre somme toute limité de variables d'effet, bien que cela puisse être une limite de notre étude, offre une vision simplifiée de cette mécanique. Il faut toutefois être conscient que s'ajoutent aux différents risques au dos (**Sagittal**, **Asymétrique**, **Cumul**) ceux des autres articulations (p. ex. genoux et épaules), et d'autres contraintes de production, au premier plan la pression temporelle (qui peut justifier une diminution des durées de transition, même si elles ne résultent pas en diminution de l'effort cumulé).

Une difficulté rencontrée dans cette analyse concerne l'importance relative de ces différents critères. Plusieurs des valeurs seuils ont été établies arbitrairement (p. ex. asymétrie), pouvant teinter certaines interprétations des résultats, en leur accordant trop d'importance. Par exemple, est-ce que les plus grands efforts asymétriques observés sont à des niveaux qui compromettent la sécurité des structures musculosquelettiques du dos? L'effet délétère des efforts en asymétrie du dos a été reconnu lorsque combiné à des flexions lombaires de grandes amplitudes. Nous reconnaissons qu'il s'agit d'une limite de notre approche et recommandons aux lecteurs d'interpréter avec prudence les meilleurs et moins bons modes opératoires en fonction de ces trois critères.

6.5 Conclusion

La signature gestuelle englobe autant le concept de diversité motrice que celui de la variabilité motrice des différents modes opératoires. Elle tient compte des modes opératoires dominants et des préférences selon le contexte. En plus d'être individuelle, la signature gestuelle est fonction du contexte de travail.

On ne connaît pas ou peu les fluctuations dans le temps de la signature gestuelle, selon les préférences, selon les dominances (apprentissage moteur), selon les décisions basées sur une lecture du contexte (qu'elles soient bonnes ou erronées ou partielles). Il s'agit de perspectives intéressantes autant dans le cadre de la prévention des TMS et de la dynamique du travailleur vieillissant, que dans le cadre de la réadaptation et de la réinsertion au travail.

6.6 Sommaire à l'intention des praticiens

La tâche effectuée par les 65 participants consistait à déplacer à plusieurs reprises quatre caisses (une à la fois) posées sur un diable vers un convoyeur et vice versa. Les données expérimentales analysées concernent uniquement le déplacement des caisses de 15 kg. Bien que ces données aient été collectées en laboratoire, l'environnement de simulation permettait aux participants de se déplacer librement sans gêne pour effectuer les transferts des caisses.

Il y a trois principaux styles de soulèvements à retenir dans le déplacement de charge d'une hauteur basse ou intermédiaire basse vers un lieu de dépôt près du sol (convoyeur à 15 cm du sol) : deux modes qui minimisent le niveau d'asymétrie, c'est-à-dire le corps centré par rapport à la charge et l'orientation des pieds pointant vers le lieu de soulèvement, et un mode de transition plus direct. Chaque mode possède ses avantages et ses inconvénients (tableau 14). Il n'y a pas de solution unique qui ait satisfait tous les critères de performance désirés : une phase de transition rapide, de faibles moments de force à L5/S1 en sagittal et en asymétrie, de faibles moments de forces aux genoux, et un faible cumul des chargements lombaires.

Les deux premiers modes (les plus fréquents) empruntent davantage un mode de transition par bloc ou par phase, et se distinguent l'un de l'autre par le ratio de sollicitation entre les genoux et le dos. La différence entre ces modes tient donc à la posture du corps au moment du soulèvement. Il y a lieu de se poser la question si pour certains, l'emprunt d'une posture du corps en demi-squat était le résultat d'une erreur d'exécution d'un squat (p. ex. où le dos serait un peu trop fléchi vers l'avant, et la flexion des genoux pas assez prononcée). Il y aurait lieu d'être attentif à ce détail dans le futur.

Tableau 14. Principaux modes opératoires au soulèvement

	Avantage	Inconvénient
Demi-squat, Pieds-Face, Charge centrée <u>De-PF-Ce</u>	Asymétrie au dos faible Sollicitation des genoux modérée	Moment L5/S1 en sagittal élevé Cumul L5/S1 en sagittal élevé
Squat, Pieds-Face, Charge centrée <u>Sq-PF-Ce</u>	Moment L5/S1 en sagittal plus faible Asymétrie au dos faible	Durée de transfert élevée Cumul L5/S1 en sagittal élevé Sollicitation des genoux élevée
Demi-squat, un pied devant l'autre, Asymétrie de charge <u>De-PD-As</u>	Durée de transfert faible (rapide) Cumul L5/S1 en sagittal faible Sollicitation des genoux modérée	Asymétrie au dos élevée Moment L5/S1 en sagittal élevé

Cumul : Impulsion angulaire (cumul des efforts).

Autres faits à noter :

- Outre ces trois principaux modes, il existe de nombreux autres modes opératoires possibles (combinaisons entre les trois paramètres de la signature) pour réaliser la tâche séquentielle.
- Lorsque la charge soulevée doit ensuite être déposée à un autre endroit, et non uniquement soulevée, une phase de transition et de nouveaux modes opératoires plus directs permettent de réaliser cette transition plus rapidement (p. ex. De-PD-As).
- Chaque individu a son propre style, ce qui marque considérablement les différences interindividuelles; et chaque style développé par les individus est caractérisé par des variations motrices et une diversité motrice (variabilité intra-individuelle) qui est possiblement un trait individuel (Srinivasan et Mathiassen, 2012b). Deux caractéristiques fondamentales qui doivent être prises en compte dans l'analyse des mouvements et dans l'analyse de l'activité de travail.
- Peu d'individus ont adopté une posture du corps en 'Stoop' lors du soulèvement de caisse à une hauteur basse. On l'observe davantage lors de la fin du transfert au moment du dépôt de caisse à une hauteur intermédiaire basse (H2) ou à une hauteur plus éloignée du sol. Les modes de dépôt en 'Stoop' qui impliquent une certaine asymétrie de charge et un positionnement des pieds moins frontal sont généralement associés aux transferts de caisse parmi les plus rapides.
- Faire attention au mode en 'Stoop' lors du dépôt avec les pieds faisant face à la charge et la charge centrée au corps (St-PF-Ce), ce mode ne semble pas offrir davantage significatif par rapport à une position du corps en demi-squat (De-PF-Ce).
- La posture du corps en squat a été observée principalement lorsque la caisse était soulevée du sol ou déposée au sol. Peu d'individus ont adopté une posture du corps en squat lors du dépôt de caisse à une hauteur intermédiaire basse ou à une hauteur plus éloignée du sol.
- Pour les hauteurs de soulèvement intermédiaires hautes (H3) et hautes (H4), la fréquence des modes de transition directe est plus élevée. Il n'y a pas un aussi grand enjeu en termes de niveau de sollicitation au dos dans le plan sagittal que pour les hauteurs de manutention

plus basses, car les efforts au dos (et aux genoux) vont en décroissant lorsque l'on considère des hauteurs de travail qui s'éloignent du sol, du moins jusqu'à H4 (soulèvement à 96 cm du sol). Pour ces hauteurs de soulèvement (H3 et H4), les deux principaux critères 'santé' à départager via un compromis concernent le niveau d'asymétrie à L5/S1 et le cumul des chargements lombaires. L'analyse des résultats montre que ces deux critères sont en opposition : c'est soit l'un ou soit l'autre.

- Certes, il y a d'autres contraintes qui sont à considérer lors du soulèvement de charge aux hauteurs plus hautes que H4 (p. ex. les épaules et possiblement le dos en sagittal aussi), mais celles-ci n'ont pas fait l'objet de cette étude.

La prudence est de mise si l'on désire généraliser ces résultats, car d'autres paramètres que ceux étudiés ici (p. ex. certains déterminants organisationnels, mais aussi matériels) pourraient influencer différemment les résultats selon les hauteurs de soulèvement et de dépôt.

Cet exercice a néanmoins démontré que les multiples modes opératoires, ceux identifiés dans le contexte de l'étude ont chacun leur coût musculosquelettique. Ce qui signifie que les répercussions de ces différents modes opératoires sur la santé des travailleurs peuvent être à différent niveau sans que l'on puisse être en mesure, à ce stade-ci, d'identifier ce qui est plus problématique à court, moyen ou long-terme pour leur santé, et à l'opposé, ce qui est plus sécuritaire pour les travailleurs.

Selon Chassaing, le geste est l'expression de l'adaptation du travailleur dans sa tâche (2004). Il est le résultat de compromis et d'ajustements du travailleur dans son contexte de travail et influencé par l'expérience du travailleur, de ses besoins, de son histoire et celle de son métier. En ergonomie, les compromis évoqués sont souvent entre la préservation de la santé et des critères de production. Ils ne sont pas toujours conscients, mais entre ces 2 pôles, il peut être plus facile de faire voir à la personne les compromis faits.

Les multiples coûts musculosquelettiques associés aux différents modes opératoires indiquent que de laisser libre le développement de savoir-faire n'est pas garant d'efficacité motrice. Comme les cibles d'exposition aux risques sont nombreuses (réduire les chargements initiaux au dos, réduire l'asymétrie, minimiser la fatigue, répartir les chargements au niveau des articulations, etc.), parfois peu complémentaires, voire opposées, l'atteinte de l'une d'entre elles peut nécessiter une forme de compromis. Soit un compromis opératoire plus ou moins conscient à l'intérieur de la dimension « préservation de la santé ». Selon une perspective de prévention des TMS, on peut se demander si la gestuelle du manutentionnaire et sa variabilité devraient davantage reposer sur des considérations liées à la préservation de la santé (en comparaison aux exigences de production et à d'autres considérations personnelles), et à une des formes de compromis « santé ».

7. TROISIÈME PARTIE – CLASSIFICATION DES INDIVIDUS

7.1 Introduction

Le chapitre précédent s'intéressait aux modes opératoires individuels les plus performants en fonction des différents contextes de manutention. Ce chapitre fait un pas en arrière en tentant de former de nouveaux sous-groupes d'individus aux profils similaires de sollicitation des structures musculosquelettiques au dos. Est-ce que les manutentionnaires les plus efficaces adoptent des modes opératoires particuliers et différents des autres individus?

Selon Clot et Fernandez (2005), une hypersollicitation de l'organisme résulterait d'une hyposollicitation de l'activité de travail. L'activité inclut les gestes et leur enchaînement, et aussi les intentions du travailleur et le sens qu'il y accorde. Le geste est multidimensionnel (biomécanique, perceptif, psychologique et social), investi (sous-tendu par des savoirs et des savoir-faire de métier, une expérience qui lui donnent un sens particulier), situé (en réponse à un contexte particulier) et construit (entre régularité à élaborer et variabilité des situations qui lui permettent de se développer). L'hyposollicitation de l'activité entraîne le sous-développement du geste et réfère à la répétition à l'identique, soit des gestes jamais complètement adaptés au problème moteur que le travailleur cherche à résoudre. Les chercheurs posent l'hypothèse que la répétition à l'identique crée une surcharge biomécanique localisée : une tension répétée des structures tendineuses et musculaires, mobilisant les mêmes structures périarticulaires, jusqu'à leur limite de rupture.

L'hypersollicitation de l'organisme serait liée au développement et l'apparition de TMS. Un individu qui adopterait une méthode stéréotypée dans sa façon de travailler (c'est-à-dire avec peu de variation; *Repeaters*), dans ce cas-ci en soulevant ou déposant une caisse, surutiliserait davantage les mêmes structures biologiques. À l'opposé, une personne qui présenterait des variantes dans ses méthodes de travail (*Replacers*) répartirait les chargements, d'une fois à l'autre, sur les différentes structures impliquées.

Le premier objectif de cette troisième partie consistait à identifier, s'il y a lieu, des sous-groupes homogènes de participants (p. ex. *Repeaters* versus *Replacers*) au niveau de la sollicitation des structures musculosquelettiques au dos et ses variations, et d'établir par la suite ce qui les distinguait au niveau de leurs modes opératoires et les variations connexes.

Un second objectif consistait à valider les éléments de variabilité des modes opératoires entre les différentes tâches, soit en comparant les résultats des huit conditions de réalisation des transferts de caisse.

L'approche adoptée est motivée par un désir de comprendre les différences interindividuelles en documentant le répertoire des gestes professionnels (stratégies opératoires) à l'aide de mesures biomécaniques. Elle peut aider à prendre la mesure de ce qu'il faut changer dans l'activité et dans l'organisation du travail. Elle peut contribuer à bonifier les interventions en prévention et en réadaptation auprès des travailleurs. Elle n'a pas été élaborée dans un objectif de sélection du personnel.

7.2 Méthodologie

L'ensemble des détails méthodologiques est décrit dans le chapitre quatre.

7.2.1 Analyse statistique

La classification proposée est basée sur le niveau de sollicitation mécanique et sa variabilité, et l'articulation L5/S1 a été ciblée. Le choix des variables pour la classification des individus repose sur une première dimension liée à l'intensité des chargements au dos afin de distinguer ceux qui adoptent des modes opératoires qui sollicitent beaucoup l'articulation L5/S1 (hypersollicitation) de ceux qui réalisent le geste avec un minimum de sollicitation des structures musculosquelettiques à L5/S1 (hyposollicitation). Une seconde dimension est liée aux variations des chargements à L5/S1: ceux qui adoptent des modes opératoires qui nécessitent des chargements au dos qui varient le plus d'une répétition à une autre (*Replacers*) et ceux qui adoptent des modes opératoires qui nécessitent des efforts au dos qui varient peu d'une répétition à une autre (*Repeaters*). Le croisement de ces deux dimensions offre donc cette classification : hypersollicitation constante, hypersollicitation variable, hyposollicitation constante, et hyposollicitation variable (tableau 15).

Les variables et les seuils associés permettant de distinguer les sous-groupes ont été établis *a posteriori* considérant l'absence de données à cet égard dans la littérature scientifique. Une analyse préliminaire encadrée par des critères a été menée afin d'identifier les différents paramètres :

- La distribution statistique des données (n=65) des deux variables doit présenter plusieurs modes ou s'apparenter au minimum à une distribution bimodale.
- Le coefficient de corrélation linéaire doit indiquer une faible relation entre les deux variables.
- Les variables doivent avoir un lien conceptuel fort (p. ex. la moyenne et l'écart type d'une mesure).
- Si la distribution s'apparente à une distribution bimodale, prendre les valeurs médianes comme seuils. L'utilisation de la médiane permet de classer ceux qui sont au-dessus ou en dessous de cette valeur médiane.

Les valeurs moyennées des huit conditions expérimentales ont été utilisées dans cette procédure.

Tableau 15. Classification des sollicitations mécaniques lombaires

« <i>Repeaters</i> »		« <i>Replacers</i> »	
Hypersollicitation constante	Hypersollicitation variable	<i>Hypersollicitation</i>	
Hyposollicitation constante	Hyposollicitation variable	<i>Hyposollicitation</i>	

Une analyse discriminante a été menée afin de découvrir et d'interpréter les combinaisons de variables discriminantes (fonctions discriminantes) qui séparent les sous-groupes les uns des autres et de prédire l'appartenance à un groupe à partir d'un ensemble de variables discriminantes. Nous avons répondu à la question suivante : quelles variables discriminantes (parmi les variables dépendantes et celles issues des variables de la signature gestuelle) sont les plus importantes pour prédire l'appartenance à un sous-groupe?

Le critère choisi est le V de Rao qui représente une mesure des différences entre des moyennes de groupes. À chaque étape, la variable qui maximise l'augmentation du V de Rao est entrée. Une variable est introduite dans le modèle si le niveau de signification de la valeur F est inférieur à 0,05 et elle est éliminée si le niveau de signification de la valeur F est supérieur à 0,10.

Les fonctions discriminantes sont comme des équations de régression; un pointage associé à la fonction discriminante est prédit à partir de la somme des variables prédicatrices, chacune pondérée par un coefficient. Il y a donc un ensemble de coefficients pour chaque fonction discriminante. Une matrice de structure fournit des « *loadings* » sous forme de corrélations de chaque variable prédicatrice pour chacune des fonctions discriminantes. Ces corrélations, lorsque mises au carré, indiquent la taille d'effet, soit la proportion de variances partagée entre chaque variable prédicatrice et la fonction discriminante.

Trois types de taille d'effet ont été rapportés, un qui décrit la variance associée à l'analyse dans son ensemble, et deux autres qui décrivent la variance associée avec les variables prédicatrices individuelles. Le η^2 partiel est calculé à partir de Lambda de Wilk suivant la procédure établie par (Smithson, 2003) et estime la taille d'effet de l'ensemble de l'analyse. Le modèle DISCRIM de SPSS Statistics (version 26, IBM ©) suppose des relations linéaires entre toutes les paires de prédicteurs au sein de chaque groupe. L'hypothèse est moins problématique (à certains égards) que d'autres, car cette violation conduit à une puissance réduite plutôt qu'à une erreur de type I accrue.

Des comparaisons de la variabilité intra-individuelle des individus de chaque sous-groupe ont été effectuées afin de faire ressortir certains traits. Des comparaisons ont été menées afin de détecter des différences entre les sous-groupes d'individus. Des analyses de variance (ANOVA) à un facteur (Sous-groupes) ont été réalisées pour comparer les moyennes des chargements au dos et des fréquences des modes opératoires. Le niveau de signification a été établi à 0,05. Un test de Bonferroni pour les comparaisons multiples a été effectué pour déterminer quelles paires de moyennes des sous-groupes étaient significativement différentes l'une de l'autre. Les analyses statistiques ont aussi été réalisées à l'aide du logiciel IBM SPSS statistics (version 26, IBM ©).

Concernant le second objectif, les signatures des différentes conditions ont été comparées qualitativement entre les tâches au niveau individuel et au niveau des sous-groupes.

7.3 Résultats

7.3.1 Classification en sous-groupes

En analysant les valeurs moyennes normalisées des chargements externes au dos et leur degré d'association entre elles (tableau 16), on note que l'association entre la moyenne des moyennes et la moyenne des écarts types des huit conditions de chaque variable est marquée par de fortes corrélations ($r > 0,69$), ce qui est le cas par exemple pour les moments de force L5/S1 asymétriques, et pour les variables liées au cumul. Cette relation positive signifie que plus la moyenne des chargements est élevée plus l'écart type l'est aussi. À l'opposé, on note des associations de moyenne à faible pour les moments de force L5/S1 en sagittal au soulèvement (Mo en sagittal vs ÉT Mo en sagittal : $r = 0,35$) et au dépôt (Mo en sagittal vs ÉT Mo en sagittal : $r = 0,18$).

Les effectifs ont été subdivisés en nous basant sur la médiane des moyennes et des écarts types des valeurs normalisées des moments de force L5/S1 en sagittal au soulèvement. Deux raisons ont justifié ce choix :

- Il existe une forte association entre les valeurs observées au soulèvement et au dépôt ($r = 0,84$). Considérant que les chargements au dos au soulèvement sont généralement supérieurs de 10-15 % à ceux observés à l'instant du dépôt (Corbeil *et al.*, 2019; Gagnon *et al.*, 2002; Plamondon, Denis, Bellefeuille, *et al.*, 2010), notre intérêt a porté principalement à l'instant du soulèvement;
- Le faible niveau d'association entre la moyenne et l'écart type des moments de force L5/S1 en sagittal et la forme des distributions de ces variables (figure 7), pouvant s'apparenter à une distribution bimodale pour la moyenne et à une distribution gamma pour l'écart type, semblent être favorable à la subdivision de l'échantillon d'individus avec ces valeurs.

Tableau 16. Degré d'association entre les moyennes et les écarts types des chargements au dos des 8 conditions de transfert de caisses de 15 kg

	Mo en sagittal Soulèvement	Mo en sagittal Dépôt	Mo asymétrique Soulèvement	Mo asymétrique Dépôt	Impulsion angulaire L5/S1 en sagittale	Impulsion angulaire L5/S1 asymétrique	ÉT Mo en sagittal Soulèvement	ÉT Mo en sagittal Dépôt	ÉT Mo asymétrique Soulèvement	ÉT Mo asymétrique Dépôt	ÉT Impulsion angulaire L5/S1 en sagittale	ÉT Impulsion angulaire L5/S1 asymétrique
Mo en sagittal – Dépôt	0.82											
Mo asymétrique - Soulèvement	0.29	0.24										
Mo asymétrique – Dépôt	0.25	0.15	0.84									
Impulsion angulaire L5/S1 en sagittale	0.37	0.42	-0.36	-0.36								
Impulsion angulaire L5/S1 asymétrique	0.11	0.07	0.02	0.04	0.63							
ÉT Mo en sagittal - Soulèvement	0.35	0.34	0.25	0.26	0.06	0.28						
ÉT Mo en sagittal – Dépôt	0.24	0.18	0.22	0.19	0.01	0.10	0.58					
ÉT Mo asymétrique - Soulèvement	0.22	0.19	0.74	0.68	-0.27	0.18	0.54	0.49				
ÉT Mo asymétrique – Dépôt	0.12	0.14	0.67	0.70	-0.37	0.05	0.36	0.37	0.77			
ÉT Impulsion angulaire L5/S1 en sagittale	0.33	0.38	-0.06	-0.07	0.69	0.48	0.30	0.29	0.14	-0.02		
ÉT Impulsion angulaire L5/S1 asymétrique	0.04	0.03	0.31	0.35	0.26	0.76	0.36	0.37	0.47	0.37	0.44	

Les cellules avec une couleur de remplissage indiquent une corrélation significative ($p < 0,05$). Les coefficients de corrélation de Pearson supérieurs à 0,4 sont indiqués en caractère gras et en rouge. Mo : Moment de force L5/S1; ÉT : Écart type.

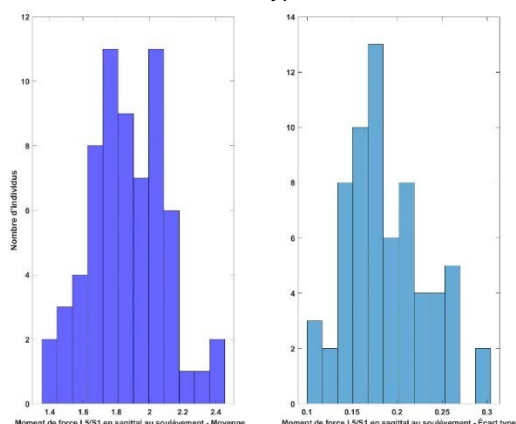


Figure 7. Histogramme des valeurs moyennes des 8 conditions expérimentales de la moyenne et de l'écart type des moments de force L5/S1 en sagittal au soulèvement calculées à partir des douze répétitions par condition.

Les résultats de cette subdivision sont illustrés à la figure 8. Quatre sous-groupes d'individus ont ainsi été formés : (1) Hypersollicitation *Replacer*, (2) Hypersollicitation *Repeater*, (3) Hyposollicitation *Repeater*, (4) Hyposollicitation *Replacer*. Il est intéressant de constater la très grande variation des mesures sur les deux axes pour une même charge de travail. Chaque point sur la figure 8 représente le sommaire de 96 transferts de caisses de 15 kg.

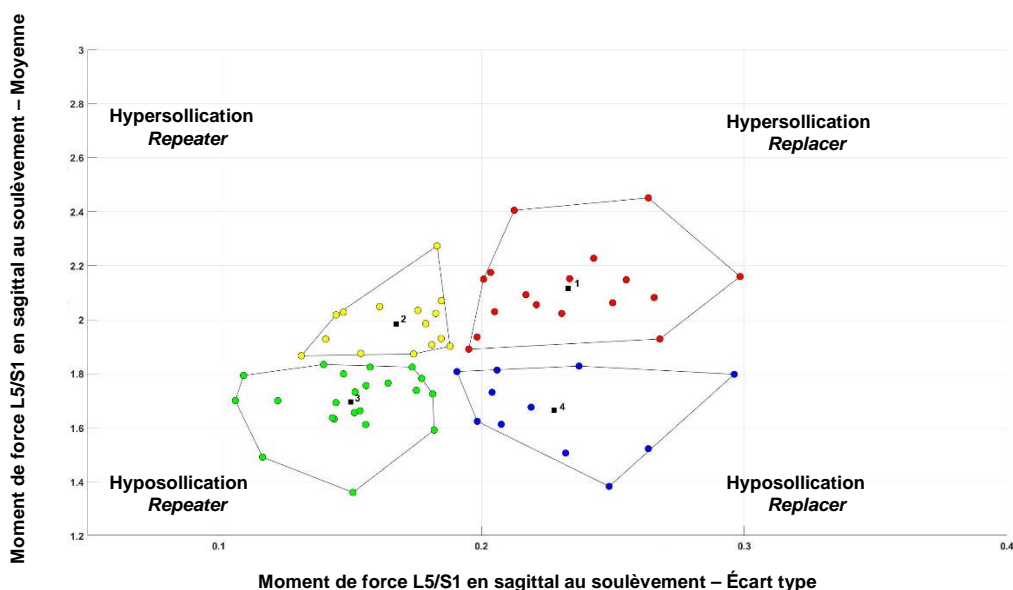


Figure 8. Subdivision des participants (n=65) basée sur la médiane des moyennes de la moyenne et de l'écart type des moments de force normalisés à L5/S1 en sagittal au soulèvement.

Note : Chaque participant est associé à l'un des quatre sous-groupes : (1) le groupe Hypersollicitation *Replacer* – en rouge; (2) le groupe Hypersollicitation *Repeater* – en jaune; (3) le groupe Hyposollicitation *Repeater* – en vert; (4) le groupe Hyposollicitation *Replacer* – en bleu. Le centroïde des groupes est indiqué par un carré noir.

Cette subdivision, lorsqu'analysée dans chacune des huit conditions des deux tâches séquentielles (figure 9), demeure relativement stable et valide, démontrant une constance globale des comportements des individus (hypo- vs hypersollicitation, *repeater* vs *replacer*); telle qu'observée au niveau des écarts entre les centroïdes des sous-groupes. L'analyse plus fine confirme en partie cette observation, principalement selon l'axe des moyennes (axe des Y): on note peu de points bleus ou verts qui se mélangent avec les points jaunes ou rouges d'une condition à une autre, indiquant que les hypo- et les hypersollicitations restent relativement invariante entre les conditions de manutention.

À l'opposé, on observe une certaine variation intra-individuelle selon l'axe des écarts types (axe des X) entre les conditions. Ceci pourrait indiquer que l'étiquette accolée à un individu comme membre d'un sous-groupe *repeater/replacer* n'est pas aussi statique qu'anticipée. Une certaine mouvance s'installe lorsqu'un individu est exposé à différentes conditions, signifiant qu'il s'adapte différemment d'une condition à une autre. La variabilité/diversité motrice, telle que mesurée par l'écart type, ne semble pas être une propriété constante; elle s'affine et devient possiblement moins variable avec une expérience significative de travail. Possiblement, une relation linéaire pourrait expliquer ce lien : plus la moyenne des écarts types est faible, moins il risque d'y avoir de variation entre les conditions, et plus la moyenne des écarts types est importante, plus on retrouve une grande variation entre les conditions. Les individus identifiés par les points bleus et rouges sont donc ceux les plus susceptibles de montrer cet effet yoyo entre les conditions.

Les sous-groupes se partagent les individus issus des catégories initiales (tableau 17). On retrouve huit des quinze experts dans le sous-groupe 3 (hyposollicitation *Repeater*) et huit femmes sur les quinze dans le groupe 2 (hypersollicitation *Replacer*). Les sous-groupes 1 (hypersollicitation *Replacer*) et 4 (hyposollicitation *Replacer*) sont principalement composés d'hommes avec peu d'expérience (65 % et 82 %, respectivement).

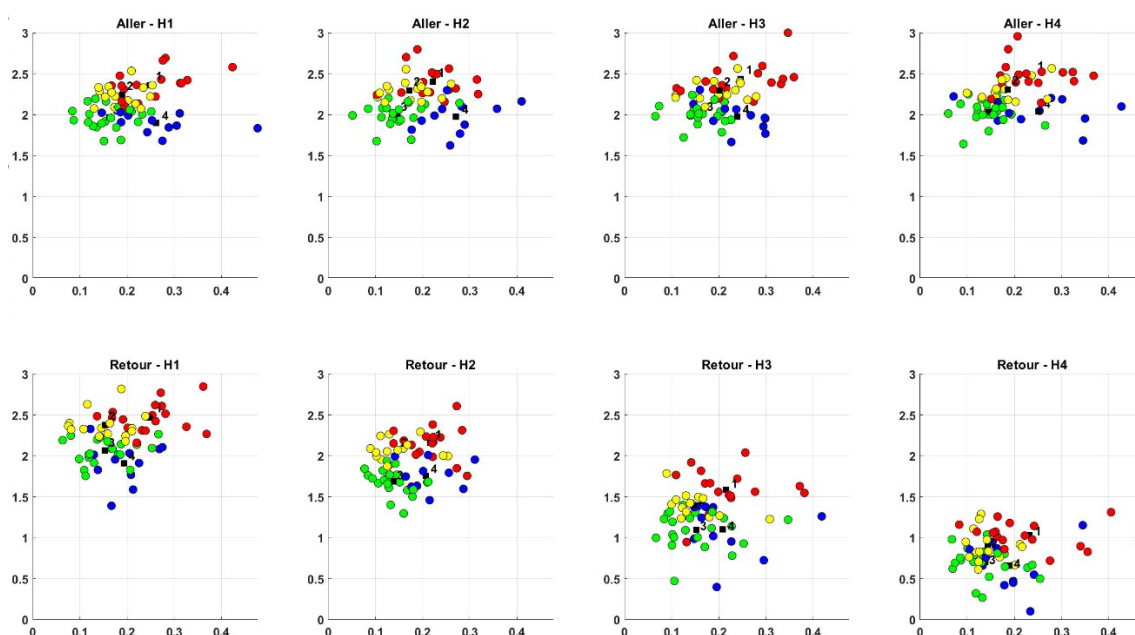


Figure 9. Quatre sous-groupes affichés pour chacune des 8 conditions (2 tâches x 4 hauteurs).

Note : Chaque participant est illustré par un point qui représente la moyenne et l'écart type de 12 essais et est associé à l'un des quatre sous-groupes : (1) le groupe Hypersollicitation *Replacer* – en rouge; (2) le groupe Hypersollicitation *Repeater* – en jaune; (3) le groupe Hyposollicitation *Repeater* – en vert; (4) le groupe Hyposollicitation *Replacer* – en bleu.

Tableau 17. Tableau croisé des sous-groupes (1 à 4) et des catégories de participants

		1 - Hypersollicitation <i>Replacer</i>	2 - Hypersollicitation <i>Repeater</i>	3 - Hyposollicitation <i>Replacer</i>	4 - Hyposollicitation <i>Repeater</i>	Total
Catégorie	E	3	3	8	1	15
	F	3	8	3	1	15
	H	11	4	11	9	35
Total		17	15	22	11	65

E = Experts hommes; F = Femmes; H = Hommes non experts.

7.3.2 Analyse discriminante

Une analyse discriminante a été menée afin de découvrir et d'interpréter les combinaisons de variables discriminantes (fonctions discriminantes) qui séparent les sous-groupes les uns des autres et de prédire l'appartenance à un groupe à partir d'un ensemble de variables discriminantes. Nous répondrons à la question suivante : quelles variables discriminantes sont les plus importantes pour prédire l'appartenance à un sous-groupe?

Les conditions pour réaliser l'analyse discriminante ont été réunies. La taille de l'échantillon du plus petit sous-groupe ($n=11$) est supérieure au nombre de variables discriminantes retenu par l'approche pas à pas ($n=9$). Cette condition permet entre autres de réduire le risque d'un sur ajustement ou *overfitting* (produisant des résultats trop proximaux à l'échantillon qui ne peuvent être généralisés à d'autres échantillons). Considérant que la taille de trois des quatre sous-groupes est inférieure à 20 et le nombre d'individus est inégal entre les sous-groupes, l'évaluation de la normalité des combinaisons linéaires des distributions de moyenne des variables discriminantes a été jugée par inspection visuelle des diagrammes de dispersion des scores de la figure 10 : on peut noter la présence possible d'une légère asymétrie (*skewness*) et l'absence de valeurs aberrantes (*outliers*). Le résultat du test de Box indique que les matrices de covariance des sous-groupes ne diffèrent pas les unes des autres ($p=0,40$). L'approche pas à pas a permis d'éviter les problèmes de multicollinéarité et de singularité en imposant des tolérances à chaque pas de l'analyse.

Ainsi, trois fonctions discriminantes ont été identifiées. Avec les trois fonctions incluses, le $\chi^2(27)$ de 118,5 indique une relation entre les sous-groupes et les variables discriminantes (*predictors*), qui est très peu susceptible d'être due au hasard. La taille de l'effet (η^2 partiel) de l'analyse dans sa globalité est de 0,50. Avec la première fonction discriminante enlevée, il y a encore une relation fiable entre les sous-groupes et les variables discriminantes, $\chi^2(16) = 58,0$, $p < 0,000$. En enlevant les deux premières fonctions discriminantes, le résultat indique que la troisième fonction discriminante est moins fiable ($p=0,16$). Le pourcentage de variance entre les sous-groupes expliqué par la première fonction discriminante est de 55,7 %, 38,3 % par la seconde et de 6,0 % par la troisième. La taille de l'effet basée sur le carré du coefficient de corrélation de chaque fonction discriminante canonique est de $(0,81)^2=0,65$, $(0,75)^2=0,56$ et $(0,41)^2=0,17$, respectivement. La figure 10 montre que les trois fonctions discriminantes sont nécessaires pour séparer les quatre sous-groupes les uns des autres. Des différences entre les scores moyens des quatre sous-groupes de chaque fonction discriminante ont été décelées à l'aide d'une ANOVA univariée à un facteur réalisé pour chaque fonction (Fonction discriminante 1 : $p<0,000$; Fonction discriminante 2 : $p<0,000$; Fonction discriminante 3 : $p=0,02$). La fonction discriminante 1 permet de séparer le sous-groupe 4 ('hyposollicitation *replacer*') des autres sous-groupes (Bonferroni : $p<0,000$). La comparaison des scores moyens de la fonction discriminante 2 indique une différence entre le sous-groupe 3 ('hyposollicitation *Repeater*') et les autres groupes (Bonferroni : $p<0,000$). Enfin, la fonction discriminante 3 permet de distinguer le sous-groupe 1 ('hypersollicitation *replacer*') et le sous-groupe 2 ('hypersollicitation *Repeater*') (Bonferroni : $p<0,01$).

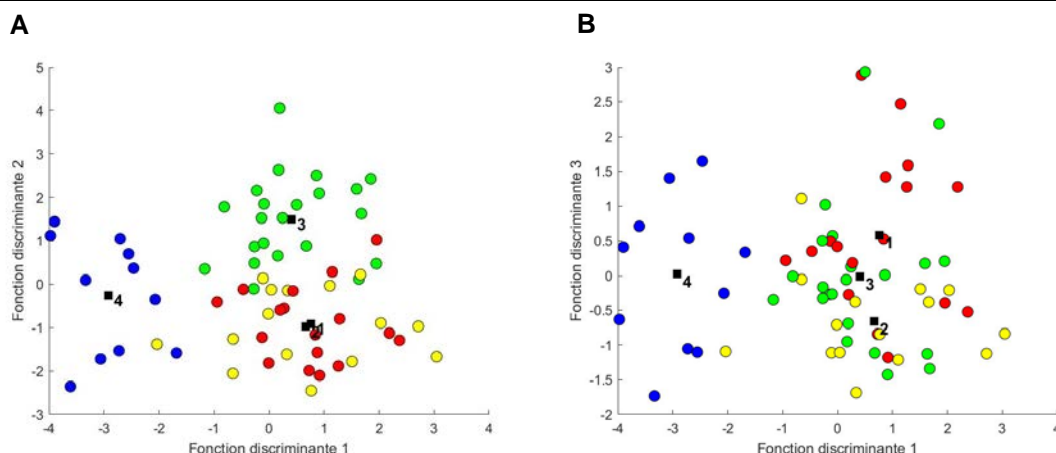


Figure 10. Nuage de points de tous les sous-groupes selon les trois fonctions discriminantes canoniques.

Note : Une fonction discriminante est affichée sur l'axe X et une autre sur l'axe Y : A. score de la fonction discriminante 2 en fonction du score de la fonction discriminante 1; B. score de la fonction discriminante 3 en fonction du score de la fonction discriminante 1. (1) le sous-groupe Hypersollicitation *Replacer* – en rouge; (2) le sous-groupe Hypersollicitation *Repeater* – en jaune; (3) le sous-groupe Hyposollicitation *Repeater* – en vert; (4) le sous-groupe Hyposollicitation *Replacer* – en bleu. Chaque sous-groupe a un centroïde pour chaque fonction discriminante; les centroïdes appariés (indiqués par un carré noir) sont tracés en fonction de leurs valeurs sur les axes X et Y.

Les coefficients de la fonction discriminante canonique normalisée 1 (tableau 18) et les corrélations (*loadings*) entre les variables discriminantes et la fonction discriminante 1 de la matrice de structure (tableau 19) indiquent que les meilleurs prédicteurs pour distinguer le sous-groupe 4 ('hyposollicitation *replacer*') des trois autres groupes sont la variabilité de l'orientation du pied contralatéral au moment du soulèvement, et, dans une moindre mesure, la posture du corps en 'demi-squat' au moment du soulèvement et la transition optimale (fluidité et travail mécanique). Un individu dont l'orientation du pied contralatéral au moment du soulèvement est variable entre les essais (peu importe la tâche), et dont la fréquence d'utilisation du 'demi-squat' au soulèvement ou des transitions optimales est plus faible, sera plus susceptible d'appartenir au sous-groupe 4 ('hyposollicitation *replacer*'). Les meilleurs prédicteurs pour distinguer le sous-groupe 3 ('hyposollicitation *Repeater*') des autres sous-groupes sont le poids du haut du corps (relation positive) et le bras de résistance au soulèvement (relation négative). D'autres variables de la combinaison linéaire de variables discriminantes contribuent partiellement au score de la fonction 2 (plus le score de la fonction 2 est élevé, plus la probabilité d'appartenir au sous-groupe 3 est importante) : la fréquence d'utilisation de transitions optimales (relation positive) et l'écart type de l'orientation du pied contralatéral au soulèvement (relation négative) (tableau 18 et tableau 19). Les meilleurs prédicteurs pour distinguer les sous-groupes 1 'hypersollicitation *replacer*' et 2 'hypersollicitation *Repeater*' (Fonction 3 : centroïde du sous-groupe 1 = 0,582 vs centroïde du sous-groupe 2 = -0,655; figure 10) sont la variation de l'écart type de la distance entre les pieds en médio-latérale au soulèvement (relation positive), la fréquence d'utilisation de transitions optimales (relation positive), la variabilité de l'orientation du pied contralatéral au moment du soulèvement (relation positive), le bras de résistance au soulèvement (relation positive), la fréquence d'utilisation de transitions optimales (relation positive) et de 'demi-squat' au soulèvement (relation négative) (tableau 18 et tableau 19).

Tableau 18. Coefficients des fonctions discriminantes canoniques standardisées

Variable discriminante	Fonction		
	1	2	3
Moment de force lié au poids du haut du corps	-0,277	1,308	0,145
Position des pieds au soulèvement – Un pied devant l'autre (C3)	0,667	0,041	0,376
Posture du corps au soulèvement – Demi-squat (C3)	0,497	-0,115	-0,486
Asymétrie au soulèvement – Neutre (C1)	0,888	-0,150	0,359
Fluidité et travail mécanique – Transition optimale (C1)	1 100	0,950	0,659
Moyenne des écarts types* - Orientation du pied contra au soulèvement	-1 467	-0,674	0,110
Moyenne des moyennes* - Bras de résistance au soulèvement	0,236	-1,814	0,307
Variabilité des écarts types* - Distance entre Pieds X au soulèvement	0,788	0,672	0,425
Variabilité des écarts types* - Inclinaison du dos au dépôt	-0,056	0,696	-0,119

*La moyenne des écarts types et la variabilité des écarts types sont calculées à partir des moyennes et des écarts types obtenus des huit tâches, respectivement. C : Catégorie du paramètre de la signature gestuelle.

Tableau 19. Matrice de structure présentant les corrélations intragroupes combinées entre les variables discriminantes et les variables des fonctions canoniques standardisées

Variable discriminante	Fonction		
	1	2	3
Moment de force lié au poids du haut du corps	-0,114	0,273	0,217
Position des pieds au soulèvement – Un pied devant l'autre (C3)	0,050	0,011	0,223
Posture du corps au soulèvement – Demi-squat (C3)	0,311	-0,135	-0,180
Asymétrie au soulèvement – Neutre (C1)	0,117	0,063	-0,428
Fluidité et travail mécanique – Transition optimale (C1)	0,149	-0,026	0,621
Moyenne des écarts types* - Orientation du pied contra au soulèvement	-0,320	-0,126	0,674
Moyenne des moyennes* - Bras de résistance au soulèvement	0,044	-0,291	0,569
Variabilité des écarts types* - Distance entre Pieds X au soulèvement	0,032	-0,005	0,705
Variabilité des écarts types* - Inclinaison du dos au dépôt	-0,140	0,074	0,064

*La moyenne des écarts types et la variabilité des écarts types sont calculées à partir des moyennes et des écarts types obtenus des huit tâches. C : Catégorie du paramètre de la signature gestuelle.

Les résultats du classement selon le modèle de l'analyse discriminante indiquent que 84,6 % des observations originales ont été classées correctement (tableau 20). Le modèle a permis d'identifier 100,0 % des individus du sous-groupe 4 'hyposollicitation *replacer*'. En contrepartie, 70,6 % des individus du sous-groupe 1 'hypersollicitation *replacer*' ont été identifiés correctement, plusieurs ayant été assignés au sous-groupe 2 'hypersollicitation *Repeater*'. Cela indique en quelque sorte les limitations de la fonction discriminante 3 à bien séparer les sous-groupes.

Tableau 20. Résultats du classement selon le modèle de l'analyse discriminante en considérant une probabilité a priori jugée équivalente entre les sous-groupes

Original	Effectif	Appartenance au sous-groupe prévu				Total
		Sous-groupe 1 - Hypersollicitation <i>Replacer</i>	Sous-groupe 2 - Hypersollicitation <i>Repeater</i>	Sous-groupe 3 - Hyposollicitation <i>Replacer</i>	Sous-groupe 4 - Hyposollicitation <i>Repeater</i>	
	1	12	4	1	0	17
	2	1	13	0	1	15
	3	1	1	19	1	22
	4	0	0	0	11	11
%	1	70,6	23,5	5,9	0,0	100,0
	2	6,7	86,7	0,0	6,7	100,0
	3	4,5	4,5	86,4	4,5	100,0
	4	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0

7.3.3 Variation intra-sous-groupe

La variation s'exprime au niveau des individus d'un même sous-groupe. En effet, au sein d'un même sous-groupe, on retrouve des combinaisons de paramètres (modes opératoires) qui diffèrent parfois les uns des autres. Les deux cas du sous-groupe 1 (Hypersollicitation *Replacer*) illustrés à la figure 11 et celui paraissant à la figure 12-1 sont des exemples assez marquants de ces différences interindividuelles, et ceci à chaque hauteur de manipulation (soulèvement ou dépôt). Il n'y aurait donc pas de catégories ou de combinaisons de paramètres de la signature gestuelle qui soient systématiques au sein même d'un sous-groupe, du moins selon les critères choisis pour créer ses sous-groupes. La fréquence d'occurrence des modes opératoires par condition, et les chargements externes au dos peuvent toutefois différer entre les sous-groupes.

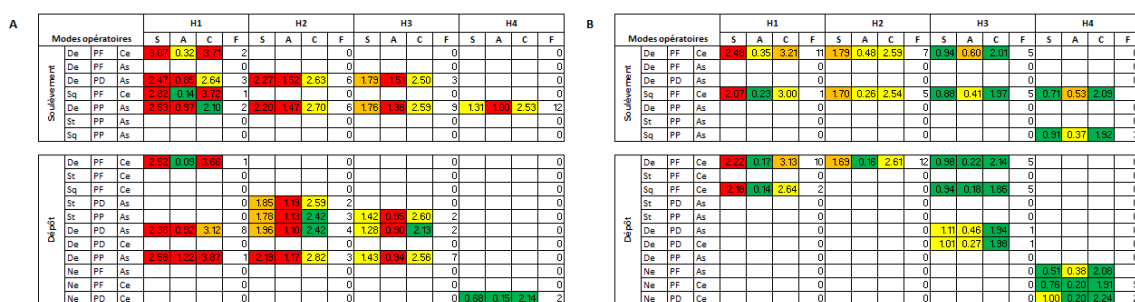


Figure 11. Résultats individuels de deux cas du sous-groupe 1 Hypersollicitation *Replacer* (un participant en A et un autre en B) et leurs principales combinaisons de paramètres de la signature gestuelle pour les soulèvements et les dépôts de charge aux quatre hauteurs (H1 à H4) sur le diable.

Note : Les chiffres dans les colonnes S, A et C sont les valeurs moyennes des paramètres. La colonne F indique la fréquence observée de la combinaison de paramètre. Tous les autres paramètres de formatage du tableau sont expliqués dans la note du tableau 13.

7.3.4 Comparaisons inter-sous-groupes

La comparaison entre les sous-groupes des moyennes des chargements au dos révèle quelques différences notables :

- Au niveau des moments de force L5/S1 en sagittal au soulèvement et au dépôt ($p < 0,000$)
 - o Les moyennes des sous-groupes 1 et 2 (en 'hypersollicitation') sont supérieures aux autres groupes (Bonferroni : $p < 0,01$);
 - o Pour le soulèvement seulement, les moyennes du sous-groupe 1 hypersollicitation '*replacer*' sont supérieures à celle du sous-groupe 2 hypersollicitation '*Repeater*' ($p < 0,05$);
- Au niveau des impulsions angulaires à L5/S1 en sagittal ($p = 0,001$) :
 - o Les impulsions angulaires du sous-groupe 2 sont plus importantes que celles des sous-groupes 3 et 4 ($p < 0,05$).

Comme indiqué précédemment, les moments de force L5/S1 en sagittal sont plus élevés pour le sous-groupe 1 comparativement aux autres sous-groupes. Les individus du sous-groupe 1 se distinguent également des autres sous-groupes par des durées de transferts moyennes de courtes durées ($p = 0,07$). Par exemple, l'écart entre le sous-groupe 1 et le sous-groupe 2 est de 613 ms ($p = 0,05$). À cause de ces durées de transferts rapides, les impulsions angulaires à L5/S1 en sagittal du sous-groupe 1 sont au niveau de celles des sous-groupes en hyposollicitation (3 et 4). Bien que les résultats des tests soient statistiquement non significatifs, les moments de force L5/S1 en asymétrie au soulèvement ($p = ,14$) et au dépôt ($p = 0,06$) tendent à être plus élevés pour les sous-groupes 1 et 4 ('*replacer*') et plus faibles pour le sous-groupe 2.

Il n'y a pas de catégories ou de combinaisons de paramètres de la signature qui soient exclusives à un sous-groupe en particulier. On observe grossièrement les mêmes combinaisons de paramètres dans chaque sous-groupe (figure 12 et figure 13). Néanmoins, on observe des différences entre les sous-groupes (tiré de la moyenne des huit conditions) en termes de fréquence :

- Posture du corps en demi-squat (C3) au soulèvement et au dépôt ($p < 0,01$) :
 - o Le pourcentage d'essais en demi-squat pour le sous-groupe 4 au soulèvement est nettement inférieur aux sous-groupes 1 et 2 (-27 et -32 %, $p < 0,05$);
 - o Le pourcentage d'essais en en demi-squat pour le sous-groupe 2 au dépôt est nettement supérieur aux autres groupes (+19-30 %, $p < 0,06$).
- Bras de résistance près du corps plus de 66 % du temps de transfert (C1) ($p < 0,05$) :
 - o Le pourcentage d'essais d'un bras de résistance réduit pour le sous-groupe 3 est plus important que le sous-groupe 1 (+26 %, $p < 0,05$).

Quelques tendances émergent aussi des résultats :

- Le pourcentage d'essais en transition optimale (C1) pour le sous-groupe 1 semble un peu plus important que les autres sous-groupes ($p=0,07$);
- Le pourcentage d'essais en asymétrie de charge au dépôt est plus faible pour le sous-groupe 2 que les autres sous-groupes ($p=0,09$);
- Le pourcentage d'essais de la position des pieds 'en parallèle' au dépôt est plus faible pour le sous-groupe 2 que les autres sous-groupes ($p=,10$).

2 - Hypersollicitation Repeater

Modes opératoires			H1				H2				H3				H4			
			S	A	C	F	S	A	C	F	S	A	C	F	S	A	C	F
Soulèvement	De	PF	Ce	2,24	0,24	3,71	10	2,05	0,25	3,02	12	1,22	0,34	2,69	9			
	De	PF	As									1,34	0,33	2,28	3			
	De	PD	As															
	Sq	PF	Ce	2,42	0,09	3,89	2							0,72	0,28	2,56	2	
	Sq	PP	As											0,45	0,40	2,74	2	
Dépôt	St	PP	As															
	Sq	PP	As											0,75	0,51	2,32	4	
	De	PF	Ce	2,17	0,16	3,89	12	1,84	0,16	3,18	9	0,72	0,08	2,17	3			
	St	PF	Ce					1,80	0,22	3,64	1	1,14	0,26	2,31	6			
	Sq	PF	Ce											0,34	0,15	1,97	2	
	St	PD	As								1,11	0,48	2,28	1				
	St	PP	As															
	De	PD	As															
	De	PD	Ce															
	De	PP	As											0,45	0,30	1,96	1	
	Ne	PF	As											0,33	0,17	2,18	6	
Ne	PF	Ce											0,29	0,12	1,97	3		
Ne	PD	Ce																

1 - Hypersollicitation Replacer

Modes opératoires			H1				H2				H3				H4			
			S	A	C	F	S	A	C	F	S	A	C	F	S	A	C	F
Soulèvement	De	PF	Ce					3,04	0,45	3,54	1	2,07	0,26	2,14	1			
	De	PF	As															
	De	PD	As	2,50	0,55	2,43	7	2,28	0,68	2,09	2	2,08	0,53	2,14	3			
	Sq	PF	Ce															
	Sq	PP	As	2,49	0,54	2,56	5	2,24	0,77	2,35	9	2,02	0,60	2,40	8	1,26	0,74	2,28
Dépôt	St	PP	As															
	Sq	PP	As															
	De	PF	Ce	2,73	0,50	3,40	1											
	St	PF	Ce															
	Sq	PF	Ce															
	St	PD	As	2,13	0,54	2,78	6	1,91	0,58	2,15	6	1,44	0,73	2,35	2			
	St	PP	As	2,02	0,65	3,29	2	1,99	0,70	2,62	5	1,50	0,56	2,52	7	0,83	0,35	1,83
	De	PD	As	2,28	0,46	3,20	1	2,01	0,93	4,09	1							
	De	PD	Ce	2,19	0,48	2,72	1											
	De	PP	As								1,44	0,56	1,78	3	1,01	0,39	2,18	
	Ne	PF	As															
Ne	PF	Ce														1,18	0,42	2,18
Ne	PD	Ce																

3 - Hyposollicitation Repeater

Modes opératoires			H1				H2				H3				H4			
			S	A	C	F	S	A	C	F	S	A	C	F	S	A	C	F
Soulèvement	De	PF	Ce	1,92	0,20	2,11	2	1,37	0,21	1,88	5							
	De	PF	As															
	De	PD	As															
	Sq	PF	Ce	1,81	0,14	2,08	10	1,24	0,21	1,58	7	0,48	0,38	1,56	10	0,38	0,44	1,41
	De	PP	As															
Dépôt	St	PP	As															
	Sq	PP	As															
	De	PF	Ce	1,32	0,09	2,04	9	0,85	0,16	1,65	9	0,19	0,23	1,36	2			
	St	PF	Ce															
	Sq	PF	Ce	1,28	0,08	2,01	3	0,69	0,29	1,58	2	0,16	0,43	1,01	1			
	St	PD	As															
	St	PP	As															
	De	PD	As															
	De	PD	Ce					0,57	0,45	1,28	1	0,28	0,44	1,25	1			
	De	PP	As															
	Ne	PF	As								0,30	0,09	1,84	1	0,19	0,15	1,23	
Ne	PF	Ce								0,25	0,23	1,12	4	0,10	0,21	1,30		
Ne	PD	Ce								0,16	0,09	0,89	1	0,07	0,13	1,18		

4 - Hyposollicitation Replacer

Modes opératoires			H1				H2				H3				H4			
			S	A	C	F	S	A	C	F	S	A	C	F	S	A	C	F
Soulèvement	De	PF	Ce	2,66	0,31	2,92	9	1,70	0,30	2,48	2	1,09	0,18	2,40	2	0,98	0,41	2,07
	De	PF	As	1,99	0,26	3,25	2	1,67	0,28	2,48	3							
	De	PD	As	1,73	0,66	2,75	1	1,78	0,43	2,66	3	1,14	0,62	2,28	4	0,88	0,57	2,00
	Sq	PF	Ce									0,67	0,59	2,09	1	0,93	0,40	2,13
	De	PP	As								1,43	0,63	2,32	3	0,97	0,66	1,97	
Dépôt	St	PP	As															
	Sq	PP	As															
	De	PF	Ce	1,86	0,33	3,10	5	1,62	0,31	2,78	3	1,01	0,15	2,08	2			
	St	PF	Ce					1,38	0,23	2,38	1	0,90	0,44	1,87	1			
	Sq	PF	Ce															
	St	PD	As	1,71	0,60	3,29	2	1,63	0,83	2,16	1							
	St	PP	As	1,88	0,80	3,08	1	1,58	0,87	2,47	4	0,90	0,27	2,32	1			
	De	PD	As	1,79	0,51	3,42	1				0,83	0,43	2,09	1				
	De	PD	Ce	1,74	0,42	3,10	3	1,57	0,37	2,52	1							
	De	PP	As								1,02	0,38	1,61	1				
	Ne	PF	As								0,81	0,41	1,83	3	0,44	0,06	1,72	
Ne	PF	Ce								0,89	0,21	1,88	3	0,47	0,23	1,80		
Ne	PD	Ce												0,46	0,18	1,62		

Niveau de risque pour S, A et C
 S <1,0 1,0<S<1,5 1,5<S<2 2<S
 A <0,25 0,25<A<0,5 0,5<A<0,75 >0,75
 C <2,5 2,5<C<3,0 3,0<C<3,5 >3,5

Figure 12. Quatre cas types des différents sous-groupes (un par tableau) et leurs principales combinaisons de paramètres de la signature gestuelle pour les soulèvements et les dépôts de charge aux quatre hauteurs (H1 à H4) sur le diable.

Note : Les chiffres dans les cases colorées indiquent les valeurs normalisées des différentes mesures. Les tableaux sont présentés dans le même format que celui du tableau 13.

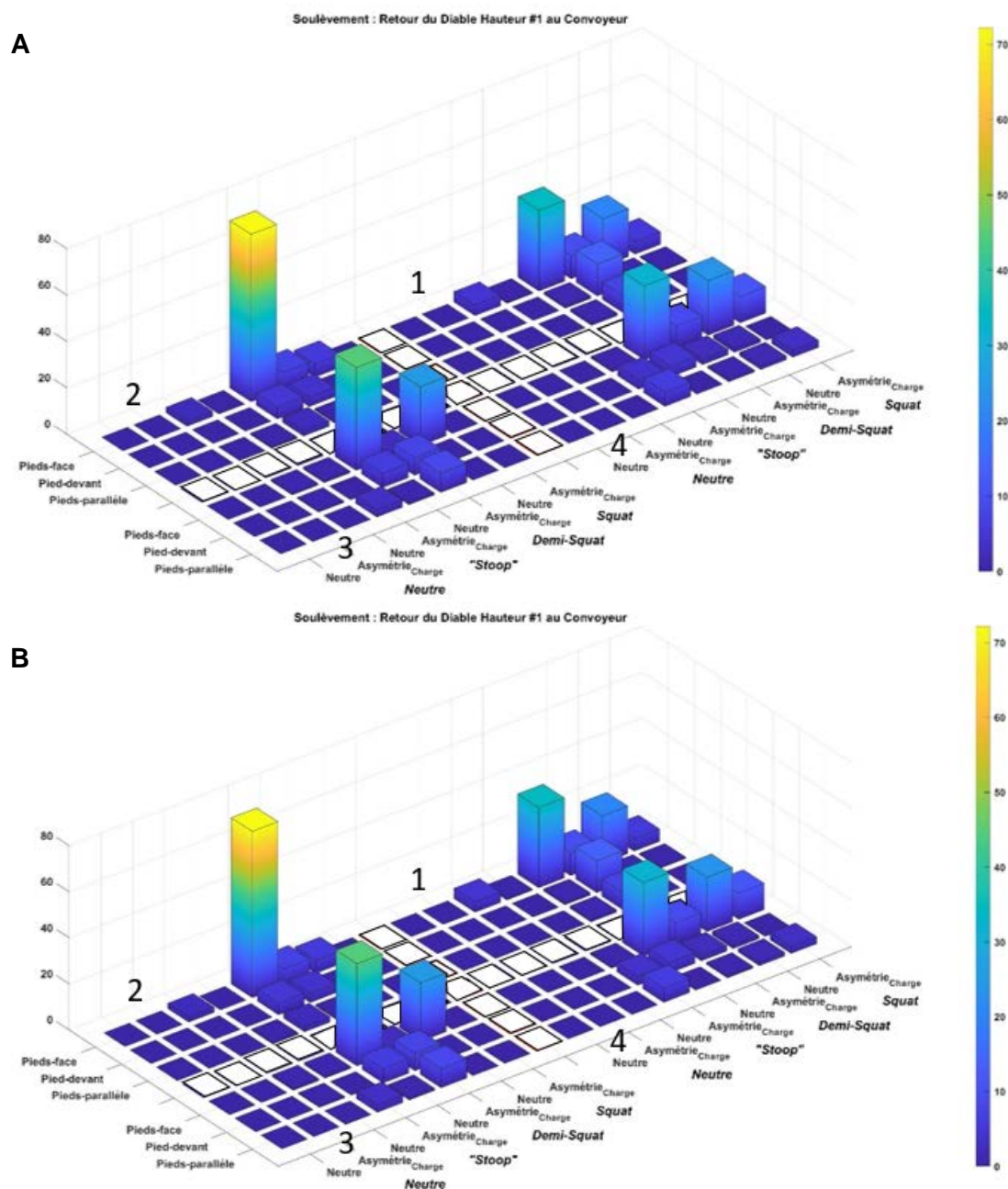


Figure 13. Pourcentage d'occurrence des combinaisons de paramètres de la signature par sous-groupe pour la condition diable au convoyeur : (A) H1 – sol et (B) H2 – hauteur intermédiaire basse.

Note : (1) le sous-groupe Hypersollicitation *Replacer*, (2) le sous-groupe Hypersollicitation *Repeater*, (3) le sous-groupe Hyposollicitation *Repeater*, (4) le sous-groupe Hyposollicitation *Replacer*. L'axe vertical des figures représente le pourcentage d'occurrence. La légende du code couleur est présentée à la droite de chaque figure. Les trois paramètres de la signature sont la posture du corps (Neutre, 'Stoop', Demi-Squat, Squat), position des pieds (Pieds-face, Pied-devant, Pieds-parallèle) et asymétrie de charge (Neutre/Centree, Asymétrie de charge). Les combinaisons de paramètres de chaque sous-groupe sont délimitées par les cases en blanc. Les figures des autres conditions paraissent en Annexe C.

7.4 Discussion

Pour une même activité réalisée par tous nos participants, dans ce cas-ci elle se résume à manutentionner quatre caisses à de multiples occasions, on remarque des niveaux de sollicitation mécanique au dos pouvant parfois être élevés et des variations interindividuelles notables dans les méthodes de travailler. Certains affichaient une tendance à agir de manière stéréotypée, c'est-à-dire avec peu de variation au niveau des sollicitations de l'organisme d'une répétition à une autre, et d'autres avaient tendance à solliciter leur organisme de manière plus variable. Une subdivision des 65 participants a été proposée en fonction de la moyenne et de l'écart type des chargements normalisés à L5/S1 en sagittale à l'instant du soulèvement. Quatre sous-groupes homogènes de participants, établis en fonction de la sollicitation des structures musculosquelettiques au dos et ses variations, ont été identifiés : (1) le sous-groupe Hypersollicitation *Replacer*; (2) le sous-groupe Hypersollicitation *Repeater*; (3) le sous-groupe Hyposollicitation *Repeater*; (4) le sous-groupe Hyposollicitation *Replacer*. Une analyse discriminante a tenté d'identifier les paramètres du mouvement qui expliquent cette classification. Les combinaisons linéaires de variables (n=9) ont permis d'atteindre cet objectif. Au final, l'analyse a convergé vers une solution optimale, offrant une sélection de variables principales dont l'interprétation n'est pas simple. En décortiquant le choix des neuf variables, on peut noter de grandes tendances.

Les neuf variables

D'une part, quatre paramètres de la signature ont été retenus, impliquant trois paramètres liés au soulèvement, soit la position des pieds (un pied devant l'autre), la posture du corps (la position en demi-squat) et l'absence d'asymétrie de charge, et un paramètre lié à la transition 'optimale' de la charge. Plusieurs travaux ont décrit l'importance du positionnement des pieds lors de la manutention par rapport au lieu de prise, durant la transition et au dépôt (Authier *et al.*, 1996; Delisle *et al.*, 1996; Delisle, Gagnon et Desjardins, 1999; Wagner, Kirschweg et Reed, 2009). L'orientation des pieds semble déterminer le niveau d'asymétrie de la posture (Delisle *et al.*, 1999; Gagnon, Plamondon et Gravel, 1993). Les résultats de l'analyse discriminante confirment l'influence marquée de la configuration posturale, définie par la posture du corps, la position des pieds et l'asymétrie de charge, sur les chargements normalisés au dos au soulèvement, au dépôt et le cumul de ces chargements, tel qu'elle a été démontrée dans le chapitre précédent (6. Deuxième partie – Impact de la signature gestuelle sur les chargements au dos). Il y a une relation de cause à effet certaine. La configuration posturale initiale est également liée à certaines règles d'action, dont l'alignement postural et l'équilibre (Delisle, Gagnon et Desjardins, 1998), mais aussi à la transition entre le soulèvement et le dépôt (Denis, Lortie, *et al.*, 2013). Le positionnement de la charge en relation avec une posture du corps, et leurs déplacements relatifs l'un par rapport à l'autre, impose des contraintes au système de contrôle postural, qu'il doit assumer en harmonie avec les mouvements du corps destinés à la manutention de la charge. Il s'agit d'actions implicites (aucune chute, ou perte d'équilibre n'a été observée), mais dont la complexité des mécanismes sous-jacents à leur exécution ne doit pas être sous-estimée (Massion, 1994). Ces actions illustrent brillamment la capacité du système de contrôle postural à s'adapter, notamment dans un contexte de manipulation d'objet externe.

L'intégration du paramètre de transition de la signature dans le modèle statistique montre le lien étroit qui existe entre la façon dont la charge est déplacée (en transition) et les conditions initiales (configuration posturale) pour assurer ce début de transition. La façon de transiter a donc une influence majeure sur cette configuration posturale (ou vice versa). Cela renforce la pertinence

de bien circonscrire le type de tâche à analyser ou à comparer, car cette transition est intégrée dans la réponse motrice et influence les chargements au dos aux instants de soulèvement et de dépôt. D'ailleurs, cela a été démontré par d'autres chercheurs qui ont observé une réduction de 13 à 15 % des chargements au dos lors de tâches séquentielles de manutention (avec transition) comparativement à des tâches simples de soulèvement (Harari *et al.*, 2019; Straker, Stevenson et Twomey, 1997). La phase de transition constitue l'une des huit règles d'action définissant la compétence d'un manutentionnaire (Denis, Lortie, *et al.*, 2013). Il est suggéré que la durée et la distance parcourue du manutentionnaire lors de cette phase de transition, lorsqu'elle est de courte durée ou caractérisée par un parcours direct de la charge déplacée, devraient limiter les effets de fatigue. Les quatre cas de figure de la classification proposée montrent quelques nuances à considérer. Bien que la fatigue n'ait pas été mesurée dans cette étude, le calcul du cumul des efforts au dos (indicateur indirect de la fatigue au dos) peut être substantiellement influencé par des moments initiaux au dos élevés lors du soulèvement (et/ou du dépôt). Il s'agit d'un tout; l'impact additif des chargements initiaux dans le calcul du cumul des efforts peut être marquant, c'est ce qui distingue notamment les groupes en hypersollicitation de ceux en hyposollicitation. Ainsi, certains modes de transition directe peuvent nécessiter ou pas des moments initiaux au dos élevés, et certains modes de transition par phase peuvent occasionner des cumuls d'effort au dos différents entre eux.

Alors, est-ce mieux de privilégier/recommander un mode de transition directe ou un mode de transition par phase (ou par bloc, un geste après l'autre) pour manutentionner une charge? Selon certains contextes de travail extrêmes, la réponse à cette question peut sembler claire : lorsque les manutentionnaires doivent exercer leur travail en présence de fortes contraintes (p. ex. : masse élevée, objet difficile à agripper, manque d'espace autour de l'objet à manutentionner), l'adoption de comportement sécuritaire pourrait être à privilégier imposant un mode de transition plutôt par phase, ou à l'inverse en absence de contraintes (p. ex. objet léger, non fragile), peu importe le mode opératoire choisit, l'un ou l'autre des modes de transition impliquerait peu de chargement au dos significatif. Dans notre cas, puisque cette analyse porte sur des déplacements de charge de 15 kg uniquement, la réponse à la question semble dépendre de la manière que la manutention a été réalisée : dépendre non pas seulement des modes opératoires choisis (diversité motrice), mais aussi dépendre de comment ceux-ci ont été exécutés (variabilité motrice), braquant ainsi nos regards sur le contrôle moteur. Bien exécuter son geste et l'adapter au contexte sont des habiletés qui garnissent le coffre à outils du manutentionnaire, qui sont également sensibles à des effets d'apprentissage, sous l'emprise d'un vieillissement inévitable, et parfois à des conditions d'inconfort et de douleur. L'exécution d'une transition directe ou par phase repose sur un choix individuel, confrontée à de possibles compromis entre les effets et/ou la performance désirée, et dictée par des processus de contrôle plus ou moins affûtés selon l'individu.

Le modèle inclut également le bras de résistance au soulèvement. Le bras de résistance ou simplement la distance horizontale entre la charge et l'articulation L5/S1 au soulèvement est un facteur important pour estimer les chargements au dos et prédire le risque de blessure (Schipplein *et al.*, 1995; Waters *et al.*, 1994; Waters *et al.*, 1993). Il s'agit aussi d'une règle d'action décrite par Denis et collaborateurs (Denis, Lortie, *et al.*, 2013). Cette variable permet de discriminer les comportements moyens de certains groupes d'individus, mettant notamment en évidence ceux du groupe Hyposollicitation Repeater adoptent des modes opératoires qui minimisent la distance entre la charge et le corps durant la transition.

Le moment de force du haut du corps, proportionnel à la masse corporelle de l'individu, est une autre variable clé permettant de discriminer les sous-groupes d'individus. Comment cette variable a pu ressortir en considérant que tous les moments de force à L5/S1 ont été normalisés? Cette variable est liée à l'appartenance du groupe 3 où les individus les plus lourds semblent y être associés. Il se peut que ceux-ci développent et adoptent des modes opératoires dont les structures sont hyposollicitées relativement à leur poids et qui s'expriment par de faibles variations (p. ex. en adoptant des modes opératoires qui minimisent le bras de résistance durant la transition). On ne peut écarter la possibilité que la procédure de normalisation choisie (moment de force à L5/S1 divisé par le moment de force généré par le poids du haut du corps à la position horizontale) ne soit pas la méthode plus appropriée bien qu'elle tente de relativiser l'impact du poids corporel sur les chargements au dos. Elle pourrait être favorable aux individus les plus lourds et/ou pourrait défavoriser les individus les plus légers. Une telle méthode est toutefois bien répandue et acceptée par la communauté scientifique et elle ne devrait pas être remise en cause.

Des paramètres liés à la variabilité des modes opératoires (intra- et intertâches) complètent le modèle statistique. Vallée-Marcotte et collaborateurs (Vallée-Marcotte *et al.*, 2021) et Authier et collaborateurs (1996) ont caractérisé et observé plusieurs positionnements des pieds lors de tâches de palettisation de charge. Cependant, les variations du positionnement et de l'orientation des pieds que l'on peut observer lorsque la même tâche est répétée dans le temps par un individu (variation intrasujet) ont été peu documentées. La sélection de ce paramètre dans le modèle statistique est un gage de son importance en contribuant à discriminer certains groupes d'individus. Les paramètres de variabilité intertâches montrent que la variabilité est dépendante du contexte (au sol généralement moins variable qu'aux hauteurs intermédiaires hautes et hautes), et que certains individus sont plus variables que d'autres, peu importe le contexte. Et si la variation des modes opératoires de manière générale était en quelque sorte causée par la variation de la position des pieds par rapport aux objets. Après tout, il s'agit de la position de départ du geste (l'ancrage au sol). Cette position a le pouvoir de dicter la suite des choses : l'asymétrie de posture et de charge, la position du corps, le mode de transition, le bras de résistance, etc. Il ne serait donc pas surprenant qu'en changeant sa position et son orientation par rapport à une charge soulevée, d'une répétition à une autre, que certaines parties du geste (ou modes opératoires) soient également variables, s'ajustant aux nouvelles conditions de départ. Contraindre le positionnement initial des pieds ou du corps (par des instructions restrictives données aux participants), ou limiter l'espace de manœuvre pour se déplacer (p. ex. limitant les mouvements des pieds sur une aire équivalente à celle d'une plateforme de force) aurait pour effet de contraindre considérablement la liberté de mouvement et réduire la variabilité du geste. Face à de telles conditions particulières, l'analyse de la variabilité devient moins généralisable, potentiellement artificielle, car on s'éloigne de l'activité réelle de travail de plusieurs travailleurs manutentionnaires.

Il n'y a pas de règle d'action en manutention qui concerne la constance du geste, autant du point de vue de la diversité motrice que de la variabilité motrice. Peut-être parce que les concepts de diversité motrice et de variabilité motrice sont relativement nouveaux, peu exploités ou investigués séparément comme deux concepts distincts (Lémonie, 2019). Cela est peut-être dû aussi au fait que la constance peut être perçue et interprétée positivement ou négativement. Le côté favorable de la constante est associé à la maîtrise du geste et à une forme de régularité associée à un bon niveau de performance. Cet énoncé copie-colle l'une des définitions de l'expertise (Bartlett *et al.*, 2007; Delignières *et al.*, 2009; Deutsch et Newell, 2005). Le côté favorable de la diversité/variabilité est associé à des comportements exploratoires, à une capacité à s'adapter aux multiples contextes, à une richesse de solutions face à un même problème ou à

un tout nouveau problème tout en offrant un bon niveau de performance à la tâche demandée (Hamill *et al.*, 1999; James, 2004; Riley *et al.*, 2001). À l'opposé, trop de variabilité/diversité peut être le présage d'un comportement immature, à la difficulté de maîtriser un geste moteur et à atteindre le niveau de performance attendu. Pour compliquer le tout, la bonne constance et la bonne variabilité devraient être associées à une économie de coût. À quoi bon d'être constant ou diversifié/variable si les solutions mises en place surtaxent le système musculosquelettique et l'exposent à des risques démesurés. Tous ces constats pointent dans une direction : le profil individuel du manutentionnaire est un déterminant majeur du niveau d'exposition au risque.

Les modes opératoires

La comparaison des éléments de variabilité des modes opératoires entre les différentes tâches (huit conditions de réalisation des transferts de caisse) mène au constat que la signature gestuelle dépend fortement du contexte et du type d'individu (selon la classification proposée). La transférabilité du concept de signature sera plus amplement discutée dans la discussion générale. Les quatre sous-groupes d'individus possèdent leurs propres spécificités à l'égard des modes opératoires les plus fréquents. Les individus du sous-groupe 2 *Hypersollicitation Repeater* ont adopté fréquemment le mode opératoire De-PF-Ce lors de la manipulation de caisse à la hauteur du sol ou à la hauteur intermédiaire basse (figure 12, figure 13). On note aussi très peu de modes opératoires en asymétrie de charge. Les sous-groupes de *Repeater* (2 et 3) sont marqués par une faible variation de leurs modes opératoires et par un ou deux modes opératoires dominants (figure 12-2-3 et figure 13). Ce résultat, bien que peu surprenant, dresse un lien clair entre le faible niveau de variation des sollicitations mécaniques au dos au soulèvement et la constance dans le choix du mode opératoire. Ainsi, pour parvenir à minimiser les variations du niveau de sollicitations mécaniques au dos, il conviendrait d'utiliser, dans la mesure du possible, le même mode opératoire.

Une seconde variable permet de distinguer les sous-groupes de *Repeater* entre eux, et cette variable est liée à l'amplitude des chargements au dos en sagittal au moment du soulèvement. La figure 12 illustre bien les différences entre les participants de l'amplitude des sollicitations tant au soulèvement qu'au dépôt, principalement à une hauteur au sol et intermédiaire basse : les résultats du participant du sous-groupe 2 indiquent des niveaux de sollicitation au dos normalisés (colonnes S et C) plus élevés que ceux des participants du sous-groupe 3 (présence ou absence de case rouge selon le cas). Notez que pour le même mode opératoire au soulèvement (De-PF-Ce), le niveau de risque est différent entre les participants. Ceci peut s'expliquer par des variations possibles à l'intérieur d'un même mode opératoire ou par des différences individuelles au niveau du contrôle moteur : une posture en demi-squat et de la position du corps en général plus ou moins favorable ainsi qu'aux aspects dynamiques liés au mode de transition et de coordination intersegmentaire. Il est également possible que la procédure de normalisation des chargements au dos puisse défavoriser certains individus ou avantager d'autres.

Aux hauteurs intermédiaires hautes et aux hauteurs hautes, pour tous les participants des sous-groupes, on observe une diminution du niveau de sollicitation au dos (colonne S et C) et un plus grand nombre de modes opératoires (plus de solutions possibles), pouvant s'expliquer par une plus forte présence de modes opératoires en asymétrie de charge. Les *Replacers* sont demeurés toutefois plus variables dans les façons de faire que les *Repeaters*. Le cas 3 (*Hyposollicitation Repeaters*) de la figure 12-3 est intéressant, car le niveau de sollicitation et de variation entre les principaux modes opératoires (De-PF-Ce et Sq-PF-Ce) est relativement faible par rapport aux autres cas illustrés (figure 12-1,2 et 4). L'adoption d'une posture du corps en squat au moment du soulèvement semble être favorable pour réduire les chargements au dos lors de la

manipulation de charge à la hauteur du sol ou à une hauteur intermédiaire basse. La figure 12-3 montre la prévalence de ce mode opératoire pour deux des tâches (soulèvement à partir du sol et une hauteur intermédiaire basse). Tout comme pour le sous-groupe 2, les *Hyposollicitation Repeaters* adoptent peu de modes opératoires en asymétrie de charge. Les *Replacers* sont caractérisés par des modes opératoires plus variés, donc moins fréquents, et intégrant plusieurs combinaisons de paramètres en asymétrie de charge.

Limite de la méthode

La classification qui a été détaillée dans cette étude est basée sur les moments de force initiaux à L5/S1 en sagittal. Considérant qu'un geste représente un tout (de l'initiation jusqu'à la fin du geste), effectué en continuité, l'instant du soulèvement a le potentiel de renseigner sur la suite du geste. D'ailleurs, une forte corrélation unit les chargements au soulèvement et ceux au dépôt, de même qu'un lien modéré l'unit avec le cumul des chargements. De plus, la position des pieds et l'asymétrie de charge au soulèvement permettent de prédire le moment de force en asymétrie à L5/S1 et le cumul des moments de force à L5/S1. L'emphase mise sur les moments initiaux à L5/S1 représente le point central de notre analyse. Toutefois, il ne faudrait pas ignorer le reste, soit les autres risques et les autres instants du geste. Les conséquences d'un geste en termes de changements articulaires peuvent être multiples. S'y intéresser de manière plus systématique pourrait permettre une meilleure catégorisation des multiples compromis en situation de travail en fonction de différentes contraintes. La classification proposée aura eu le mérite d'attirer notre attention sur l'amplitude de ces sollicitations et sur le niveau de variation de ces sollicitations. Le cadre théorique est applicable à tous les niveaux articulaires.

7.5 Conclusion

L'hypersollicitation de l'organisme serait liée au développement et l'apparition de TMS. Nos résultats indiquent que cet énoncé pourrait être enrichi d'une nouvelle dimension en considérant également le concept de diversité/variabilité motrice et la classification *Repeaters* et *Replacers*. Cette classification n'est pas totalement nouvelle (Côté, 2012) bien que peu validée. S'appuyant sur l'hypothèse de surutilisation des structures impliquées dans la production de mouvements stéréotypés qui n'auraient pas suffisamment le temps de récupérer entre les répétitions et le développement de symptômes chroniques avec le temps (Bartlett *et al.*, 2007), certains auteurs avancent que des *Repeaters* seraient plus à risque de développer des TMS que des *Replacers* (Côté, 2012; Kilbom et Persson, 1987). Jumelé ensemble, hypo- vs hyper et *Repeater* vs *Replacer*, cette nouvelle classification offre de nouvelles perspectives en matière de prévention de TMS, et de réadaptation en situation de limitations fonctionnelles ou de retour au travail. Bien que la démonstration reste à faire, le sous-groupe d'individus *Hypersollicitation-Repeater* serait potentiellement les plus à risque de développer un TMS.

7.6 Sommaire des résultats à l'intention des praticiens

Quatre sous-groupes de manutentionnaires ont été formés en fonction du niveau de sollicitation musculosquelettique au dos normalisé selon le poids du haut de leur corps lors du soulèvement et du niveau de constance de ces sollicitations d'une répétition à une autre : on note des individus qui sollicitent peu le bas de leur dos et qui sont constants d'un essai à un autre, d'autres qui sollicitent peu le bas de leur dos et qui sont variables d'une répétition à l'autre, d'autres qui sollicitent plus fortement le bas de leur dos en étant plus constants ou plus variables. Le niveau de variabilité des sollicitations au dos semble directement proportionnel au niveau de

diversité/variabilité des modes opératoires. Dans l'analyse de l'activité, ils s'avèrent donc importants de considérer à la fois les façons de faire d'un travailleur (diversité motrice), mais également la variation de ces façons de faire pour une même tâche (variabilité motrice).

Parmi les quinze participants experts de sexe masculin qui ont participé à cette étude, huit d'entre eux ont été classifiés dans le sous-groupe Hyposollicitation Repeaters (sous-groupe 3). Le lien entre l'expertise et le sous-groupe Hyposollicitation Repeaters est à étudier davantage (voir la Discussion générale). La formation des sous-groupes n'est pas une fin en soi, mais elle met en lumière le comportement différent entre les individus qui réalisent une même tâche. On observe donc de grandes variations entre les participants, et à ce stade-ci, aucun lien n'a été établi entre l'appartenance à l'un de ces quatre groupes et l'incidence de blessures au dos. Cependant, certains sous-groupes ont un niveau de sollicitation musculosquelettique au dos qui est relativement plus élevé que d'autres. Considérant que le risque est proportionnel au niveau de sollicitations et inversement proportionnel aux capacités fonctionnelles (qui dépendent de la condition physique, du vieillissement, du stress et autres paramètres de l'équation personnelle), certains sous-groupes et individus seraient possiblement plus à risque de développer un trouble musculosquelettique.

Prédire l'appartenance à un de ces quatre groupes n'est pas une tâche simple : il n'y a pas de façon simple pour y arriver. Neuf variables ont été retenues par le modèle, et constituent nos repères d'observation proposés.

- Certains critères d'observation concernent l'instant du soulèvement de la charge et la phase de transition:
 - o la position des pieds au soulèvement, notamment si le manutentionnaire adopte une position caractérisée par un pied devant l'autre;
 - o la posture du corps au soulèvement, notamment si le manutentionnaire adopte une posture en demi-squat;
 - o l'asymétrie de charge au soulèvement, notamment s'il demeure centré par rapport à sa charge;
 - o si la transition pour déplacer la caisse est fluide et directe;
 - o si le bras de résistance au soulèvement est plus court.
- Le poids du haut du corps du manutentionnaire.
- D'autres critères sont plus difficiles à évaluer, car il nécessite l'observation de plusieurs essais et parfois plusieurs tâches pour en évaluer les variations. L'accent est mis sur la variation de la position et de l'orientation des pieds d'une répétition à une autre :
 - o La variation de l'orientation du pied contralatéral au moment du soulèvement;
 - o La variation entre les tâches de la variabilité de l'espacement entre les pieds en ML à l'instant du soulèvement;

Un sommaire des différences cinétiques et cinématiques entre les quatre sous-groupes est présenté dans le tableau 21.

Tableau 21. Sommaire des différences entre les sous-groupes

<p>Hypersollicitation <i>Repeater</i></p> <p>++ Moment de force L5/S1 en sagittal au soulèvement et au dépôt ++ Impulsion angulaire à L5/S1 en sagittal 'De-PF-Ce' (Demi-squat-Pieds faces- charge centrée– mode opératoire prévalent % des essais - demi-squat plus élevé % des essais – en asymétrie plus faible % des essais – pieds en parallèle au dépôt très faible</p>	<p>Hypersollicitation <i>Replacer</i></p> <p>++ Moment de force L5/S1 en sagittal au soulèvement et au dépôt + Moment de force L5/S1 en asymétrie au soulèvement et au dépôt Variation des modes opératoires plus importante Mise sous charge rapide % des essais – transition optimale plus élevé</p>
<p>Hyposollicitation <i>Repeater</i></p> <p>Bras de résistance au soulèvement est plus faible % des essais – Charge près du corps plus élevé</p>	<p>Hyposollicitation <i>Replacer</i></p> <p>+ Moment de force L5/S1 en asymétrie au soulèvement et au dépôt Variation des modes opératoires plus importante Variation de l'orientation du pied contralatéral au moment du soulèvement plus élevée % des essais en demi-squat plus faible % des essais – transition optimale plus faible</p>

8. DISCUSSION

Une des caractéristiques essentielles du mouvement est sa variabilité (Latash et Anson, 2006). Le bagage gestuel de l'humain est riche en possibilités. Pour une tâche réalisée dans un même contexte, certains individus adoptent/exploitent une gestuelle avec peu de variation entre les répétitions, d'autres adoptent une gestuelle à dimension variable à chaque occasion. Le niveau de sollicitation musculosquelettique de chacune de ces solutions varie, le coût 'musculosquelettique' pouvant être très variable d'un individu à un autre. Cet exercice aura permis de prendre pleinement conscience de cette réalité. L'analyse des résultats ne rend pas complètement justice à la complexité du geste; les méthodes utilisées tentent de simplifier cette complexité pour en comprendre l'essence. Nous proposons ainsi une catégorisation simplifiée des actions du geste de manutention (posture du corps, position des pieds et alignement entre la charge (les mains et le corps). Bien que dans chaque catégorie de mode opératoire il puisse y avoir de la variabilité, nous en sommes conscients, cette classification a le mérite d'établir des regroupements prévalents et d'avoir permis des comparaisons qui ont guidé et enrichi nos réflexions.

En effet, ces résultats se répercutent sur de multiples dimensions. Considérons-en au moins quatre : l'une liée à la transférabilité du concept de signature, une autre à la marge de manœuvre, l'autre à l'expertise et à sa caractérisation, puis à l'apologie de la répétition dans un contexte quasi expérimental.

8.1 Transférabilité du concept de signature

Le troisième objectif établi au départ consistait à valider les éléments de variabilité des modes opératoires entre différentes tâches. Nous avons tenu pour acquis que pour comprendre le bagage gestuel d'un individu, il fallait l'exposer à une variété de contraintes (la tâche, l'environnement et l'individu). Les résultats de notre étude indiquent que la signature de la gestuelle, un amalgame de préférences et d'habitudes, est fortement dépendante des contraintes de ce système. Le souhait initial de comparer la signature des tâches impliquant le déplacement de quatre caisses d'un diable et à un convoyeur à celui du transfert de caisses de palette à palette ne s'est pas concrétisé pour cette raison. Le chevauchement des contraintes entre ces deux familles de tâches était trop partiel pour y trouver des similitudes et parvenir à valider le concept. La signature gestuelle dépend de l'origine et de la destination de la charge à déplacer (hauteurs et aussi la disposition physique de ces lieux et des charges environnantes), de la distance qui sépare ces lieux et des caractéristiques de la charge. Bref, les modes opératoires sont adaptés au contexte et les résultats (et les observations) de notre étude sont possiblement spécifiques aux situations reproduites en laboratoire.

La comparaison des tâches 'Aller' et 'Retour' a permis de documenter les limites de la signature gestuelle. La tâche 'Aller', impliquant le transfert de quatre caisses du convoyeur au diable et la tâche 'Retour', soit le transfert de quatre caisses du diable vers le convoyeur, sont en apparence deux tâches qui se ressemblent.

- Considérant que le soulèvement requiert des actions (processus neuromusculaire) différentes du dépôt, l'effet hauteur prend toute son importance pour distinguer les conditions de réalisation. Prendre haut et déposer bas dans une tâche séquentielle n'est pas équivalent à prendre bas et déposer haut. Chaque condition est marquée par une signature gestuelle qui lui est propre, difficilement transférable à un contexte différent. Le facteur Hauteur représente

donc une contrainte déterminante de la forme de la signature gestuelle (Harari *et al.*, 2019; Lavender *et al.*, 2003; Plamondon, Larivière, *et al.*, 2012). Tout autre déterminant qui induirait un changement de trajectoire de l'objet à déplacer serait possiblement aussi influent (p. ex. contrainte d'espace et obstacle).

- L'effet Masse influence la signature gestuelle, mais à un moindre niveau lorsque comparé à l'effet Hauteur. L'effet Masse sur la signature gestuelle est observé pour les deux tâches, interagissant parfois avec l'effet Hauteur. Il est également possible que d'autres caractéristiques de la charge puissent influencer la signature.
- On dénote une certaine démarcation des signatures gestuelles entre les différents groupes de participants formés *a priori*. Des effets Genre/Sexe, Surplus de poids et Expertise ont été détaillés précédemment. L'effet expertise, qui ressort clairement de nos analyses, indique une tendance centrale intéressante qui lie une faible variabilité intra-individuelle et une faible diversité motrice et l'expertise, mais elle se reflète peu ou pas sur des gains fonctionnels tangibles (p. ex., la diminution des moments de force L5/S1 en sagittal). Cet aspect sera discuté dans une prochaine section. Considérant le manque de constance dans les façons de faire pour un même individu, et l'hétérogénéité des variations intra-individuelles au sein des groupes formés *a priori*, cela peut limiter notre compréhension du facteur si la variabilité intra-individuelle et interindividuel n'est pas considérée.
- La formation de sous-groupes *a posteriori* a permis de voir que les individus en hyposollicitation ou en hypersollicitation l'étaient pour les huit conditions (deux tâches). Ceux en hypersollicitation se distinguaient de ceux en hyposollicitation, peu importe la combinaison de hauteurs soulèvement-dépôt. Notre analyse a permis d'apprécier que la variabilité intra-individuelle ne suivait pas cette même logique. Il apparaît que les sujets ont des modes opératoires qui leur sont propres et qu'ils tentent de reproduire de manière préférentielle. Soit ils ont privilégié la constance, soit ils tentent une diversité de façons de faire. Toutefois, certaines configurations du contexte ont amené certains à faire autre chose.
- Le geste est composé de mouvements coordonnés et qui sont extraits d'une séquence de déplacements de caisses qui était assez réaliste; la transition qui lie le début à la fin du transfert peut prendre différentes couleurs selon ce qui est fait durant les prémanceuvres et selon la configuration posturale initiale du corps (incluant les mains et les pieds par rapport à la charge) et/ou ce qui sera fait après le dépôt. Cette interconnectivité est propre à chaque tâche et la nôtre s'y apprête bien. Cela peut être un gage de transférabilité des connaissances issues de ce projet vers les milieux de travail, du moins on le souhaite.

Comparer des pommes avec des pommes : les tâches doivent être similaires pour être comparées, notamment la hauteur à l'origine et celle à la destination. La signature gestuelle est influencée par ces facteurs. Nous sommes d'avis que, lorsque la variabilité motrice est au cœur des discussions, qu'il est primordial de préciser le contexte dans lequel elle s'exprime, c'est-à-dire en précisant la nature de la tâche (cyclique, séquentielle ou discrète, dans un environnement ouvert ou fermé) et les critères de performance recherchés. La tâche de manutention étudiée est séquentielle et sa finalité (niveau de performance) était d'empiler quatre caisses une par-dessus l'autre, au rythme du participant, en s'assurant que l'empilement des caisses soit en équilibre, ou déposer une après l'autre les caisses sur un convoyeur.

8.2 Marge de manœuvre

La latitude dont un travailleur dispose entre certaines limites, qui peut s'exprimer par des possibilités d'actions effectives, ou du moins interprétées comme telles par le travailleur en fonction de sa situation vécue (Quéré, 1997), régie par des contraintes internes ou externes, est ce qui définit la marge de manœuvre (Marquié, 1995). Peu d'études ont réussi à quantifier la marge de manœuvre, la qualifiant même de difficilement objectivable (Lémonie, 2019).

Le concept de marge de manœuvre est une notion que nous avons tenté d'opérationnaliser en décortiquant la gestuelle opératoire de 65 participants, lorsqu'exposés aux mêmes conditions de manutention répétées dans le temps. Est-ce un concept central pour l'action? En partie. Le concept est central dans le sens qu'il est associé aux conditions de réalisation et à la notion d'environnement « favorable » ou « constructif ». Considérant les liens de cause à effet probants entre certains déterminants (p. ex. la masse des charges manutentionnées, les hauteurs de soulèvement/dépôt) et l'exposition aux risques de troubles musculosquelettiques, il convient d'agir pour offrir aux travailleurs les meilleures conditions de réalisation pour effectuer ces tâches. Lorsque les meilleures conditions sont réunies (ou l'on tend vers ses conditions idéales), cela peut avoir un impact positif sur le travailleur, car cela diminue la **probabilité** qu'il puisse être exposé à des risques de problèmes musculosquelettiques importants, c'est-à-dire par des chargements moins élevés au niveau de ses structures musculosquelettiques et/ou par l'adoption de postures de travail moins problématiques pour sa santé musculosquelettique. La création d'un environnement de travail favorable pour la santé des manutentionnaires est un pas dans la bonne direction, mais ne garantit pas l'adoption de comportement sain ou d'une gestuelle marquée par le sceau d'une efficience sécuritaire.

Le mot clé ici est **probabilité**. Il faut s'entendre sur la portée de ce mot.

Les chances qu'un manutentionnaire fléchisse le corps pour soulever une caisse à la hauteur de la taille sont faibles, ou qu'un manutentionnaire coincé entre un transpalette et deux étagères en coin remplies de produits pour sa commande puisse adopter un jeu de pieds nécessitant de grands pas sont faibles. Il s'agit de cas simplifiés où il est facile d'anticiper l'impact de ces conditions de réalisation sur les postures de travail pour accomplir la tâche. Mais au-delà des impacts possibles du positionnement du corps, il y a aussi la façon dont le geste est exécuté. La façon de faire le geste est le fruit d'actions musculaires et est directement branchée aux chargements sur les structures musculosquelettiques. Cette étude a clairement montré que la variation des façons de faire entre les répétitions réalisées dans des conditions de réalisation identiques a le potentiel de faire varier significativement les chargements articulaires au dos. La caisse soulevée à la hauteur de la taille peut être réalisée avec les bras plus ou moins en extension (distance élevée entre le centre de la caisse et l'articulation L5/S1 au bas du dos) et/ou avec un mouvement brusque caractérisé par une forte accélération verticale et dans le plan horizontal. Ces manières de faire nécessitent différents niveaux de sollicitation musculaire au dos et aux autres articulations. Offrir des conditions de réalisation plus favorables peut permettre d'augmenter le pourcentage de chance qu'un mode opératoire se produise, mais ne garantit pas l'élaboration d'une façon de faire sans effet défavorable sur la santé du travailleur.

Avoir plus de latitude n'est pas suffisant pour prédire. Tout comme une absence de liberté n'est pas nécessairement défavorable pour la santé du travailleur. Dans ce sens, le risque associé aux conditions de réalisation d'une tâche est guidé par la marge de manœuvre, mais n'est pas défini par elle. Ce qui est central pour l'action demeure l'individu et ses aptitudes sociales, cognitives,

affectives et physiques. Chaque individu est différent, et possède sa propre signature gestuelle. Cette signature gestuelle est caractérisée par un degré de régularité tant au niveau de la diversité motrice qu'au niveau de sa capacité à reproduire un même mode opératoire de la même façon. Lémonie a proposé d'inclure dans ce cadre conceptuel de prévention des TMS les concepts de variabilité motrice et de diversité motrice. Ces concepts tiennent des liens étroits avec la fatigue, la douleur et la performance, bien que les relations de cause à effet demeurent à être validées (Gaudez *et al.*, 2016; Srinivasan et Mathiassen, 2012a, 2012b). Ces dimensions ont été mises en évidence dans cette étude.

Dans une situation où la marge de manœuvre est importante, la diversité d'actions n'est pas un gage de succès pour assurer une solution motrice sécuritaire pour la préservation de soi en hyposollicitant certaines fonctions. À l'opposé, dans une situation où la marge de manœuvre est faible, la limitation des solutions motrices, s'il y a, sera toujours sujette au contrôle d'un grand nombre de degrés de liberté du système musculosquelettique sous l'effet de contraintes (Bernstein, 1967) et à une caractéristique fondamentale du mouvement, sa variabilité (Srinivasan et Mathiassen, 2012b).

Le passage de la marge de manœuvre à la préservation de TMS doit nécessairement bifurquer sous les projecteurs de la dimension motrice de l'activité mise en œuvre par les travailleurs. On doit s'intéresser à comment les travailleurs s'y prennent pour réaliser le travail exigé et aux coûts engendrés par l'exécution des modes opératoires.

L'analyse de nos données a permis de constater que l'ajout de contraintes liées à la configuration du contexte avait un effet sur la diversité des modes opératoires et leurs coûts (5. Première partie - les variations intra- et interindividuelles : effets du contexte). Le coût associé à l'ajustement des modes opératoires pour une manutention près du sol se reflète par une hypersollicitation relative des structures musculosquelettiques du bas du dos dans le plan sagittal et une augmentation de la variabilité de ces effets. Des modes de transition plus réguliers ont été observés, caractérisés par des configurations posturales initiales et terminales faisant face à la charge manipulée lorsqu'elle était basse comparativement aux hauteurs plus éloignées du sol. Cela a été clairement profitable à réduire les chargements au dos en asymétrie et ses variations intra-individuelles. L'effet Masse a aussi engendré une augmentation nette de la sollicitation relative des structures musculosquelettiques du bas du dos et de ses variations. De plus, une diminution de la variabilité motrice et de la diversité motrice de la quasi-majorité des modes opératoires a été observée lors de la manutention de la caisse la plus lourde, peu importe la hauteur de manipulation de la charge (à l'exception du marqueur de fluidité dont la variabilité a augmenté). Le croisement de ces deux facteurs (hauteur et masse) n'a pas conduit à une exacerbation des effets observés pour chacune des contraintes, mais plutôt à une addition des effets.

Coutarel et collaborateurs (2015) ont mentionné que lorsque la marge de manœuvre situationnelle est faible, les possibilités de modes opératoires sont restreintes, ce qui pourrait conduire à une hypersollicitation de certaines fonctions (articulaires, musculaires, cognitives, etc.). Les effets des deux contraintes étudiées (Hauteur et Masse) d'un point de vue global sont considérables en termes des sollicitations relatives des structures musculosquelettiques du dos et de ses variations et tendent à confirmer l'affirmation. Cependant, en analysant le comportement des 65 participants, la dimension personnelle (ressources internes) prend une place importante dans le modèle et nuance significativement ce résultat. La classification des participants indique que l'exposition au risque est nuancée par les modes opératoires choisis (diversité motrice), leur efficacité à solliciter minimalement les structures musculosquelettiques et leur constance

(variabilité motrice). Tout cela repose sur des aspects liés au contrôle de la motricité, et donc sur des traits individuels des participants.

Plusieurs revues de littératures ont clairement montré que la variabilité motrice/diversité motrice peut être différente d'un individu à un autre lorsqu'ils exécutent certaines tâches spécifiques, et que des caractéristiques personnelles (p. ex. : l'expertise, le genre, l'avancé en âge) peuvent être des déterminants de cette variabilité (Gaudez *et al.*, 2016; Srinivasan et Mathiassen, 2012a, 2012b). Selon le type de tâche et la variable de performance scrutée, la variabilité motrice peut être considérée comme « positive » lorsque les résultats désirés du geste ne sont pas affectés, ou comme « mauvaise » lorsque les résultats de l'action le sont (Cusumano et Cesari, 2006; Latash et Anson, 2006; Schoner, 1995). Ceci est particulièrement problématique dans le cas de la manutention, considérant le fait que de déplacer une caisse d'un point A à un point B est généralement couronné de succès à coup sûr. Il n'y a donc pas de réels mauvais résultats, à quelques exceptions près (p. ex. quantité totale de caisses à déplacer avec ou sans contrainte de temps). Le point d'ancrage servant à distinguer le bon du mauvais ne peut s'arrêter sur une variable liée aux résultats de l'action. Madeleine et Madsen (2009) soulignent la difficulté de catégoriser la variabilité motrice comme bonne ou mauvaise dans une tâche occupationnelle et l'associer à la prévention des blessures musculosquelettiques. Une classification de *Repeaters* et de *Replacers* a été proposée (Côté, 2012) appuyée par l'hypothèse de surutilisation des mêmes structures impliquées (qui n'ont pas le temps suffisant pour récupérer) dans la production de mouvements stéréotypés et le possible développement de symptômes chroniques avec le temps (Bartlett *et al.*, 2007). Certains auteurs avancent que des *Repeaters* (en santé) seraient plus à risque de développer des TMS que des *Replacers* (Côté, 2012; Kilbom et Persson, 1987). À notre connaissance, ces concepts n'ont jamais été validés à partir de données récoltées sur le terrain ou de tâches occupationnelles simulées en laboratoire.

L'efficacité réfère à la performance souhaitée (production, qualité) à moindre coût préférentiellement compatible avec la préservation de la santé du travailleur et/ou le développement de soi par le travail (Coutarel *et al.*, 2015). Dans le cas spécifique de la manutention, la préservation de la santé est un enjeu de taille. Considérant qu'un accroissement du niveau de sollicitation des structures musculosquelettiques augmente le risque de blessures (Bernard, 1997; Burdorf et Sorock, 1997), cette dimension doit nécessairement être prise en considération dans l'étude de la variabilité motrice. Un individu qui adopte des modes opératoires variables d'une fois à l'autre et très coûteux en termes de sollicitation musculosquelettique (peu efficace pour la préservation de la santé) se distingue d'un autre individu qui adopte des modes opératoires variables, mais sécuritaires pour sa santé. Une nouvelle classification des individus a été établie en fonction du niveau de sollicitation des structures musculosquelettiques au dos au soulèvement (hypo vs hypersollicitation) et de la variabilité de ces chargements (*Repeater vs Replacers*). Le croisement de ces deux dimensions révèle des comportements individuels très différents en fonction des différentes marges de manœuvre situationnelles testées. Les résultats présentés dans ce rapport ont le mérite de quantifier ces différences interindividuelles. Que cette classification soit réelle ou artificielle, les comportements et les coûts extrêmement variés demeurent réels. Pour un même contexte (une marge de manœuvre déterminée), il existe bien une variété de modes opératoires qui ont des coûts très différents, certains individus privilégient certaines façons de faire, d'autres individus adoptent d'autres façons de faire. Pour un même contexte, un individu peut adopter différents modes opératoires aux coûts qui peuvent différer. Cette démonstration indique clairement que le contexte de travail ne détermine pas à lui seul le niveau de risque (Harari *et al.*, 2020); le niveau de risque est grandement influencé par les coûts engendrés par les modes opératoires choisis. Cette affirmation est vraie pour les situations avec marge de

manœuvre et elle l'est tout autant pour les situations où la marge de manœuvre est plus faible. Bien sûr, la diversité motrice est affectée par une marge de manœuvre situationnelle lorsqu'elle est faible, mais possiblement pas au point d'être réduit à une solution motrice unique. Chaque solution motrice, même lorsque répétée, sera unique, exprimant ainsi une autre forme de variation.

La notion de compromis prend aussi une place importante dans cette mise en scène. La rupture de tension viscoélastique des disques lombaires dépend plus fortement de l'amplitude des chargements que de la fréquence des chargements (van Dieen et Toussaint, 1997). En revanche, le développement de la fatigue musculaire est très sensible aux variations dans l'amplitude des chargements, même si le niveau de chargement moyen est maintenu constant (Mathiassen, 1993), et le temps de travail versus le temps de repos est également important (Rohmert, 1973). Le niveau d'asymétrie durant les efforts peut également exacerber les effets au niveau du dos (McGill, 1997). Ainsi, en milieu de travail, la relation entre la variation de l'exposition biomécanique et la santé peut différer selon le résultat visé (Mathiassen, 2006). Choisir un mode opératoire pour réduire la mise sous charge de l'objet manutentionné peut être bénéfique pour minimiser la fatigue, mais peut aussi nécessiter beaucoup d'effort asymétrique pour effectuer cette transition rapide. Choisir un mode opératoire sécuritaire, favorisant un alignement postural neutre, un faible bras de levier entre le corps et la charge et impliquer davantage la flexion des membres inférieurs, peut être bénéfique pour réduire les efforts initiaux observés au soulèvement, mais peut aussi accentuer les contraintes mécaniques aux genoux, occasionner une mise sous charge un peu plus longue et propice au cumul des efforts. Les multiples modes opératoires rapportés dans notre étude illustrent les différentes variations de l'exposition biomécanique. Un choix de mode opératoire, ou une décision contextuelle (formelle ou non), peut s'avérer nécessaire pour réduire l'un ou l'autre de ces risques. Sans vouloir trop minimiser les multiples compromis, deux grandes tendances peuvent être rapportées :

- Une technique sécuritaire exécutée par bloc ou par phase qui est associée à un transfert de l'objet plus lent; Ici, plus lent n'est pas toujours associé à un cumul des efforts plus élevé.
- Un mode de transition directe, qui est associée à un mode de transition plus rapide, mais qui nécessite une importante dose d'efforts asymétriques. D'ailleurs, un moment en asymétrie à L5/S1 élevé a été associé à un faible cumul des chargements (corrélation, $r=-,36$; tableau 16).

Ces deux tendances illustrent bien la notion du compromis : quand un risque est diminué, un autre est augmenté. Il n'y a pas de solution qui puisse taire tous les risques.

La force de nos observations s'appuie sur trois modalités expérimentales : le nombre élevé de participants, le nombre de répétitions des conditions expérimentales et l'utilisation d'une grande surface de travail instrumentée. Le nombre élevé de participants qui ont participé à l'expérience, incluant des experts (des hommes dans ce cas-ci), des participants femmes et des participants avec des caractéristiques anthropométriques très variées, permet à notre analyse de se distinguer des autres études en considérant un échantillon plus substantiel et représentatif d'une population de travailleurs. Pour mettre en valeur la variabilité motrice et la quantifier individuellement, il faut parvenir à identifier les différents modes opératoires et les observer à plusieurs reprises. Le nombre de répétitions par condition s'avère un élément clé. Cette deuxième condition est peu conciliable avec la réalité terrain et rarement observée dans les études réalisées en laboratoire. L'utilisation d'une grande surface de travail a permis de ne pas trop restreindre les déplacements des participants en situation de manutention et ainsi permettre la simulation d'une tâche de manutention en laboratoire qui était réaliste. La mesure des forces de réaction au sol

sur cette surface instrumentée a mené à l'estimation des chargements au dos des participants; soit des variables clés de nos analyses.

La catégorisation proposée par la signature gestuelle est une tentative d'isoler les principaux modes opératoires. Bien qu'elle soit imparfaite, les onze paramètres de la signature gestuelle et certaines combinaisons de ces paramètres ont renseigné d'une certaine façon sur les différents modes opératoires propres à la tâche étudiée. Ces combinaisons ont permis d'offrir un portrait de la diversité motrice. Cependant, il n'a pas été possible d'isoler la variabilité motrice intra-individuelle de chacun des modes opératoires du participant de chaque condition expérimentale, notamment à cause du nombre de répétitions qui n'était soit pas assez élevé ou la fréquence de certains modes opératoires était trop faible. La mesure de variabilité basée sur l'écart type des observations a plutôt estimé une variabilité motrice globale de chacune des tâches.

Les résultats de notre étude indiquent que certains participants ont été plus efficaces que d'autres, en termes de réduction des chargements au dos et de constance pour une même tâche. Une classification a été proposée mais elle ne représente pas une fin en soi. Elle est plutôt la démonstration qu'il existe bel et bien des différences marquées au niveau des modes opératoires entre les individus. Ces différences ont été notées dans des contextes de manutention plutôt ciblés, caractérisés par la présence de certaines contraintes de travail. Il faut faire attention à la généralisation des résultats à d'autres contextes de manutention ou autres tâches. Est-ce que ces résultats peuvent éventuellement contribuer à changer la donne au niveau de la conception des tâches? L'objectif devrait toujours demeurer de créer un environnement de travail favorable au maintien de la santé des travailleurs : rechercher des hauteurs de travail adaptées, une cadence de travail imposée acceptable, optimiser les déplacements de charge et leurs caractéristiques. Bref, minimiser le coût « externe » humain. Au niveau de l'organisation du travail (diversification des tâches dans un quart de travail, rotation de poste, etc.), nos données ne nous permettent pas de déterminer s'il s'agit de levier favorable ou non favorable pour la santé.

Nos résultats montrent que ce n'est pas tout de créer cette marge de manœuvre. Il y a un coût « interne » humain à la réalisation de ces tâches. L'exposition finale est aussi tributaire des caractéristiques individuelles des travailleurs et des façons de faire qu'ils déploient. C'est à ce niveau qu'une attention supplémentaire doit être portée lors de l'évaluation des tâches et du travail.

Peu importe le type de classification qui mettra en valeur les différences individuelles au regard de la variabilité motrice, des études causales devront faire la démonstration que certains profils d'individus sont plus à risque que d'autres à développer des TMS. Si de telles associations étaient trouvées, il faudra éventuellement réévaluer les comparaisons entre groupes d'individus en considérant cette dimension. À ce jour, aucune réponse uniforme ne peut être attendue quant à l'ampleur et au type de variation qui seraient les plus appropriés pour prévenir l'apparition de TMS en fonction des marges de manœuvre situationnelles.

8.3 Expertise

L'expertise d'un manutentionnaire, ou d'un autre corps de métier, n'est pas un concept simple à définir. La qualité d'expert est souvent associée à l'expérience, mais surtout à un haut niveau de compétence. On associe l'expertise à la capacité d'un individu à atteindre leur objectif, en maximisant la probabilité de succès et en minimisant les coûts de production et de mise en œuvre (Leplat et Pailhous, 1981).

C'est en observant et en testant des manutentionnaires experts et novices qu'il a été possible de décrire des différences de modes opératoires les plus importantes : la position du corps des sujets au début du transfert et au moment du dépôt, leurs mouvements de pied pendant le transfert et la manipulation de la charge et sa prise, incluant le déplacement de la charge avant le soulèvement, la trajectoire de la caisse pendant le transfert et le déplacement de la charge après le dépôt (Authier *et al.*, 1996). Le lien entre ces façons de faire et les chargements au dos, ou aux autres articulations du corps, n'a pas été clairement démontré. Plamondon et collaborateurs (Plamondon, Denis, Delisle, *et al.*, 2010) ont rapporté l'absence de différences nettes entre un groupe d'experts hommes et d'un groupe de novices hommes au niveau des chargements au dos pour deux types de tâches de manutention. La présente étude y apporte une légère nuance, à savoir que les chargements externes normalisés en asymétrie au dos des experts étaient 33 % inférieurs à ceux des manutentionnaires novices lorsque les caisses étaient déposées au sol seulement, le même niveau d'asymétrie était observé aux autres hauteurs de dépôt entre ces groupes. Cela dit, les variations inter-essais des chargements normalisés à L5/S1 des manutentionnaires hommes experts étaient plus faibles que celles des manutentionnaires hommes novices. Pour une même tâche qui est répétée à de multiples reprises dans le temps, les sollicitations musculosquelettiques au dos étaient plus constantes et régulières chez les experts comparativement aux novices. Les différents modes opératoires l'étaient aussi. Il est probable que ces différences soient le fruit d'un apprentissage moteur qui se raffine avec l'expérience de travail.

Authier et Lortie (1993) ont interrogé vingt-huit manutentionnaires expérimentés, considérés comme les meilleurs de deux sociétés de transport. Les résultats montrent l'absence de consensus entre les manutentionnaires experts sur les meilleures méthodes de travail. Les experts semblent privilégier différentes stratégies en fonction du contexte de travail et de leurs priorités personnelles. Deux aspects retiennent notre attention : (1) les critères pour classer un individu expert sont à préciser, où expérience ne rime pas nécessairement avec expertise; (2) les individus sont foncièrement différents les uns des autres, notamment selon leurs priorités, leurs connaissances, et leurs aptitudes et habiletés individuelles (motrices, cognitives, émotionnelles et sociales). L'homogénéité d'un groupe d'individus ne fait pas nécessairement bon ménage avec les différences interindividuelles. Des 'croisements' dans les façons de faire ont été notés entre les groupes de manutentionnaires. Par exemple, bien que des tendances générales soient identifiées pour distinguer des groupes de travailleurs, certains manutentionnaires novices exécutaient des façons de faire comparables à certains experts (et vice versa) et certains manutentionnaires obèses se démarquaient de leurs collègues par un chargement externe au dos équivalent à celui de manutentionnaires experts de poids santé (Corbeil *et al.*, 2014). Les savoir-faire de prudence ne sont pas exclusifs à un seul groupe d'individus.

Il appert donc que diverses sources de variation (p. ex. classification des individus, différences interindividuelles) peuvent jouer le rôle de 'contaminant' lors des analyses statistiques différentielles, limitant la capacité à extraire des différences au niveau des comportements moyens entre les groupes étudiés. Hormis la variabilité associée aux contextes des tâches du travail, notamment au niveau de la disposition des caisses à déplacer et de leur masse, force est de constater, même dans un cadre de travail contrôlé, que la variabilité motrice (inter- et intra-individu) de la gestuelle des manutentionnaires (c'est-à-dire, la séquence de mouvements exécutés) constitue une réalité qu'il faut considérer.

Le troisième volet de cette étude a tenté de redistribuer les cartes en fonction de nouveaux critères, en subdivisant les individus en sous-groupes selon des seuils médians de la moyenne

et de la variabilité des moments de force normalisés au dos en sagittal à l'instant du soulèvement. Cette façon de faire a permis, sans tenir compte des étiquettes individuelles (homme, femme, expert, novice, en surplus de poids ou pas), de grouper des individus en fonction de leur profil de chargements au dos (efficacité sécuritaire), et d'analyser sous ce nouvel angle leurs modes opératoires. Nous avons constaté que ce nouveau regroupement ne permettait pas d'identifier des modes opératoires exclusifs à un sous-ensemble d'individus alors que de nettes distinctions au niveau des chargements étaient observées entre les sous-groupes. Sans revenir sur les explications de ces différences, il convient de se questionner sur la proximité des modes opératoires observés parmi les individus du sous-groupe 3 (Hyposollicitation *Repeaters*) à ceux d'un comportement que l'on attribuerait à un expert. De fait, huit des quinze experts ont été intégrés à ce sous-groupe, plus que tout autre sous-groupe. Les individus ont adopté des modes opératoires associés à des chargements relatifs en hyposollicitation et parmi les plus réguliers de tous les participants. L'analyse de ces résultats et ceux issus d'études ergonomiques (Authier et Lortie, 1993; Lortie, 2002) révèle que l'expertise pourrait avoir plusieurs couleurs et plusieurs formes, pouvant s'exprimer différemment entre les individus ou entre sous-groupes d'individus. Rien n'empêche également de concevoir que l'expertise pourrait avoir une couleur et une forme dominante : par exemple, Hyposollicitation *Repeaters*.

La proximité de ces résultats avec ceux issus des sciences de l'activité physique et sportive tend à confirmer ce constat. La technique idéale en sport, décrite par des séquences de mouvements réalisés par les différents segments corporels, celle que l'on décrit dans les livres, n'existe pas et n'est jamais réalisée (Durand, Geoffroi et Jacquemond, 1993). Selon Durand et collaborateurs (1993), le modèle du discours technique se fonde, d'une part, sur l'idée de régularité, de stabilité (constance et invariance) des réponses individuelles et, d'autre part, sur l'idée de principes généraux, d'invariants qui traversent les adaptations individuelles et qu'il faut nécessairement respecter pour être performant. En manutention, des principes généraux ont été proposés (Ayoub, 1982; Chaffin, Gallay, Woolley et Kuciamba, 1986 ; Denis, Plamondon, St-Vincent, Gonella et Lortie, 2013), mais ils ne constituent pas tous des invariants à proprement parler. Bien que la nature de ce qui demeure constant ou invariant risque d'être différent selon le type de tâche, la demande associée à ces tâches (le contexte et les objectifs de production), la décision du manutentionnaire concernant laquelle prioriser (et comment faire), résultat du processus de régulation, chamboule ou met au défi ces invariants. Les prémanceuvres, qui consistent à rapprocher la charge (sans la soulever) ou à pivoter/incliner la charge, devraient à tout le moins en être un, car il conditionne les modes opératoires liés au transfert.

Cette variabilité est un peu déconcertante lorsqu'on tente de se coller à une technique universelle et que l'on constate la singularité des individus. En proportion, ou en probabilité, on observe plus souvent ou moins fréquemment tel ou tel mode opératoire, mais de manière globale les nuances entre les sous-groupes sont plutôt faibles et pâles. Le découpage en sous-groupes regorge encore d'individualité et de différences interindividuelles, illustrant à la fois la complexité et la diversité humaine. Bien que l'on puisse réussir dans la tâche de manutentionner avec des réponses différentes les unes des autres, ces différences individuelles s'observent aussi possiblement en cours d'apprentissage, au plan cinématique (forme spatiale des mouvements) et cinétique. Cette variabilité devrait diminuer à mesure que l'expertise s'accroît et de manière globale, l'effet Expertise de nos résultats tend à confirmer cette affirmation. Ainsi pour certains individus les mouvements deviennent de plus en plus constants. Pour d'autres, la variabilité inter-essai acquise avec la pratique pourrait avoir d'autres formes et d'autres buts.

Il est difficile de juger si la variabilité motrice observée est le résultat d'une erreur dans l'habileté motrice programmée et exécutée ou si elle joue un rôle fonctionnel, soit dans l'acquisition d'une variabilité optimale qui assurerait une forme d'adaptabilité du geste favorable à la prévention des TMS ou dans la production de la performance (Lémonie, 2019). Ce n'est pas notre intention de débattre sur le sujet. Cependant, nous sommes d'avis que lorsque la variabilité motrice est au cœur des discussions, qu'il est primordial de préciser le contexte dans lequel elle s'exprime, c'est-à-dire en précisant la nature de la tâche et les critères de performance recherchés.

Nous sommes également d'avis, que d'« enseigner une palette de modes opératoires possibles, plutôt qu'un seul, va sans doute dans le sens de favoriser la construction, par chacun, d'un style propre et d'une meilleure capacité d'adaptation à la variabilité des conditions de travail » (Daniellou, 2003). L'enjeu se situe au niveau de l'apprentissage d'une gestuelle à multiples couleurs, avec une modulation de la variabilité motrice adaptée au contexte et à des critères de santé. Certes, la variabilité peut être vue comme une richesse dans le mouvement : par exemple dix façons différentes de faire un geste, impliquent des façons différentes de fatiguer les muscles, donc la possibilité de faire la tâche plus longtemps. Les résultats de notre étude tendent à indiquer autre chose, soit un ajustement de la variabilité motrice en fonction du contexte. Dans tous les cas, les modes opératoires observés chez les experts ou chez les quatre sous-groupes doivent être vus comme une opportunité d'élargir le vocabulaire gestuel.

8.4 Apologie de la répétition

Nos résultats démontrent également toute l'étendue des variations intra-individuelles et ses liens complexes avec le contexte de travail. Lémonie souligne avec justesse que même le geste le plus répétitif du travailleur à la chaîne est toujours unique (Lémonie, 2019).

Comme l'indiquent certains chercheurs, plusieurs essais sont nécessaires pour observer une signature gestuelle (Granata *et al.*, 1999). Combien? Difficile d'y répondre : Peut être suffisamment, sans dénaturer la tâche demandée de son côté réaliste, pour convenir à une expérience réaliste (en durée) et pour capter l'ensemble des variables dans les différents contextes testés. La signature gestuelle peut prendre différentes formes (voir la figure 20 à l'annexe C) et chaque essai contient ses différences. Le retrait des 'outliers' est à proscrire (sauf pour des techniques problématiques), car on retire une partie de l'individualité. À l'opposé, ce qui est insuffisant, c'est une seule répétition, ou peu de répétition. Un seul essai par condition est insuffisant pour estimer une variable en raison de la variabilité inhérente des mesures biologiques et parce qu'il est insuffisant pour estimer une variable à valeur réelle dont les distributions ne sont pas connues. En répétant la même condition plusieurs fois, la forme de la distribution peut être estimée, ce qui permet de choisir le bon estimateur pour caractériser cette distribution (p. ex. la valeur moyenne d'une distribution normale). Le risque avec un seul essai est d'obtenir une estimation qui se situe aux extrêmes de la distribution et qui peut surestimer ou sous-estimer la réalité. Et cela peut biaiser l'interprétation des résultats et des conclusions associées.

Quatre essais ont été répétés pour la charge lourde (23 kg) et nous considérons que cela est limite. Dans une planification optimale, nous aurions prévu davantage de répétitions pour cette condition. Nous avons tout de même réalisé quelques analyses statistiques dans ce contexte, en considérant cette limite. Chacune des répétitions d'un même individu dans un même contexte offre de l'information et contribue à enrichir la forme et la couleur de la signature gestuelle.

8.5 Limitations

Quelques limitations sont à noter concernant les résultats de cette recherche.

Bien que les tâches soient expérimentales, elles n'en sont pas moins contraintes; contraintes de manière externe, par les objets à manutentionner et l'environnement de travail, et contraintes de manière interne, par les intentions qui guident l'action du participant (faire le plus vite possible pour en être débarrassé, même si ce n'est pas demandé; faire le mieux possible selon les mouvements et les postures, puisque l'on participe à un projet de recherche). Le choix de la reprise des données déjà recueillies limite les possibilités de connaître ces véritables intentions. Bien que les tâches étaient réalistes, elles peuvent être dépourvues de véritables enjeux pour les personnes qui l'accomplissent.

La dimension collective du travail de manutention n'a pas été considérée dans ces travaux.

Nous avons postulé que la marge de manœuvre préexistait par rapport aux participants et que ceux-ci l'utilisaient au mieux. Il est possible que la marge de manœuvre soit élaborée par les participants eux-mêmes et que cette élaboration soit faite en fonction des contraintes, mais aussi des ressources externes et internes de chacun.

Plusieurs choix méthodologiques ont été faits et pourraient constituer une limitation :

- Nous n'avons pas tenu compte du moment de force maximal au niveau L5/S1, mais plutôt choisi d'analyser le moment de force à l'instant du soulèvement (et du dépôt). Bien que l'instant du moment maximal survienne légèrement après l'instant du soulèvement proprement dit, ces valeurs sont relativement proportionnelles l'une à l'autre. Comme autre élément à considérer, la méthode pour détecter l'instant du soulèvement (à l'instant où la caisse n'est plus en contact avec la surface d'appui) peut être sujette à une source d'erreur. Ces instants ont été détectés manuellement par des opérateurs et sont sujets à l'erreur humaine; d'ailleurs cela a été constaté à quelques occasions dans la base de données originale avant d'être corrigé.
- La normalisation des moments de force et des impulsions angulaires à L5/S1 par le moment généré par le poids du haut du corps en position horizontale a été réalisée, car le poids de la personne est une variable qui a une forte influence sur le calcul des chargements au dos. Il s'agit d'une méthode qui assure une assise commune pour la comparaison, mais elle peut possiblement désavantager certains individus. Les liens qui peuvent exister entre le risque de blessure et les chargements au dos normalisés ne sont pas aussi développés. Nous émettons l'hypothèse que les propriétés musculosquelettiques des participants sont adaptées à leur masse corporelle.
- L'utilisation de variables discrètes dans l'analyse du mouvement est fréquente, ce que nous avons fait, mais peut ne pas être suffisante pour fournir une description exhaustive du mouvement observé. Quand une seule mesure est extraite d'une variable continue, une grande quantité de données sont rejetées et des informations potentiellement utiles peuvent être écartées (Ryan, Harrison et Hayes, 2006). En effet, l'allure des courbes cinématiques et cinétiques est souvent un bon indicateur du « comment » une tâche motrice est accomplie et peut nous aider soit à les classer (physiologique versus pathologique), ou à caractériser le comportement dans le temps. En ce sens, la période de transition pourrait bénéficier d'une meilleure caractérisation que ce qui a été proposé.

- Dans cette étude, la variabilité intra-individuelle a été caractérisée par un marqueur relativement simple, soit l'écart type. Pour un ensemble d'observations, l'écart type indique l'écart moyen des observations autour de la moyenne des observations. Bien que l'écart type est calculé à l'aide de la moyenne et qu'il s'agit d'une variation autour d'une valeur centrale, son interprétation (le sens qu'on lui donne) doit être rattachée à la moyenne. Il est donc possible d'observer des écarts types similaires, mais pour des moyennes différentes. D'autres méthodes pour quantifier la variabilité auraient pu être utilisées et nous vous référons à une revue de littérature récente pour en savoir plus (Srinivasan et Mathiassen, 2012b). La variabilité présentée dans notre étude est les résultats d'un regroupement d'essais similaires, mais dont les conditions ont été réalisées avec des charges de 15 kg ayant des caractéristiques différentes (instable, décentrée et centrée) et deux configurations physiques du diable et du convoyeur (90° et 180°).
- Les résultats s'appliquent à une tâche de manutention séquentielle. Les résultats pourraient être différents si la tâche n'impliquait qu'un soulèvement ou qu'un dépôt (Harari *et al.*, 2019).
- Le nombre de participants, bien qu'il soit impressionnant pour ce type d'étude biomécanique, reste limite pour mener des analyses statistiques (équations d'estimation généralisées, analyse discriminante). D'ailleurs, le modèle proposé par l'analyse discriminante n'a pas été validé par un jeu de données distinct. Bien que la méthode de l'analyse discriminante limite la multilinéarité et les singularités, il est fort possible que d'autres variables puissent permettre une séparation entre les sous-groupes. D'ailleurs, nous convenons que les résultats du modèle mènent à une utilisation limitée, car il n'y a pas de variables 'terrain' qui puissent pour le moment être observées simplement et objectivement pour juger de l'appartenance à un des quatre sous-groupes. Des tendances émergent, beaucoup plus complexes qu'initialement préconçues et peuvent appuyer certaines démarches (formations, futures expérimentations). Elles renseignent également sur les observables de l'activité de manutention : bien que déstabilisant et peu rassurant pour les préventionnistes/ergonomes, cela démontre qu'il ne suffit pas de regarder l'inclinaison du dos, mais aussi observer la position des pieds et juger de l'asymétrie et évaluer la constance à travers les répétitions.
- La signature gestuelle n'est aussi qu'une proposition avec ses limitations. Il semble évident, pour qui observe un manutentionnaire déplacer une boîte, que le transfert, d'un essai à l'autre, puisse être de forme analogue. Selon Durand et collaborateurs, la difficulté de l'analyse est la suivante : « jusqu'à quand peut-on dire que deux formes sont identiques malgré des transformations ou des variations? Se pose ici le problème des limites entre deux formes : [...] quel seuil adopte-t-on pour considérer une production (formelle ou non) comme constante ou changeante? » (1993). L'ensemble des catégories des paramètres ont été définies de manière objective, mais le choix des seuils n'est pas immuable. De plus, nous avons considéré que pour une catégorie d'un paramètre, les mouvements pouvaient être considérés comme constants, mais avec davantage de précision, on constate qu'il y a de la variation au sein même de la catégorie. Néanmoins, avec le recul, certains paramètres de cette signature s'avèrent fort utiles, alors que d'autres moins, et de nouveaux paramètres pourraient être pensés. Tout le volet coordination n'est pas satisfaisant. La transition mériterait une certaine complexité, notamment en intégrant le mouvement des pieds en relation avec le déplacement de la charge. La prémanœuvre est loin d'être suffisante notamment sur les possibilités que cela offre de décrire la richesse des manœuvres possibles (p. ex. l'ajout d'actions qui tendent à faire pivoter/incliner la boîte pour assurer une prise confortable avant le soulèvement). Enfin les post-manœuvres semblent tout aussi intéressantes à intégrer. Parmi les bons coups, nous

retenons la posture du corps, la position des pieds et l'asymétrie (postural et de charge). D'ailleurs, le mixte de ces modes opératoires a permis de faire ressortir des liens très éloquentes entre ces postures et les efforts. Du coup, la notion de compromis devient beaucoup plus évidente et quantifiable; très révélateur et prometteur pour la suite.

- La variabilité motrice d'un mode opératoire et la diversité motrice (entre modes opératoires) sont possiblement deux sources de variations de nos mesures de variabilité. Une réduction de la variabilité motrice peut être causée par un mode opératoire qui devient moins variable, et/ou par une diversité motrice qui est plus limitée. Leur dissociation n'a pas été complètement possible dans notre contexte expérimental, malgré l'ajout de l'indice de dispersion.
- La variabilité motrice peut être observée à plusieurs niveaux (figure 2) : de la performance en générale, de la cinétique et de la cinématique du mouvement et à partir de signaux électromyographiques des muscles ciblés, pourrait l'être aussi au niveau de signaux électroencéphalographiques. C'est surtout au niveau musculaire que le lien entre les variations de l'exposition aux risques et les TMS s'est principalement établi. En particulier, une bonne récupération des muscles est considérée comme d'une grande importance pour éviter les TMS. Dans ce contexte, la variation de l'exposition a pour but de donner aux unités motrices d'un muscle l'occasion de se détendre, autrement elles pourraient être en surcharges. Ceci peut être réalisé en déplaçant l'activité vers d'autres muscles à l'extérieur ou dans la même synergie (Palmerud, Sporrang, Herberts et Kadefors, 1998), ou vers d'autres régions au sein des mêmes muscles (Mathiassen et Winkel, 1990), ou peut-être même vers d'autres unités motrices au sein de la même région (Westad, Westgaard et De Luca, 2003). La variabilité motrice n'a pas été étudiée à ce niveau dans notre étude.

9. CONCLUSION

Bien que les TMS soient davantage considérés des « pathologies de l'organisation du travail » (Caroly, 2006), nos travaux proposent un léger retour du balancier pour redorer le blason des « pathologies du geste ». La marge de manœuvre basée sur le concept de régulation devrait prendre en considération les dimensions de la variabilité motrice et de la diversité motrice telle que Lémonie le propose (2019). La variabilité motrice et la diversité motrice sont des éléments clé à comprendre, car elles ont le potentiel d'expliquer pourquoi, lorsque soumises au même ensemble de facteurs de travail externes (contraintes), certaines personnes parviennent à préserver leur santé sans être affectés, et maintenir de bonnes performances au travail tandis que d'autres sont en affectées, que ce soit du point de vue de la préservation de la santé, de la performance ou les deux.

Nos travaux visaient une meilleure identification et compréhension de la diversité et de la variabilité des stratégies opératoires (exclusivement la dimension motrice) mobilisées en situation de manutention et de leurs impacts sur les sollicitations musculosquelettiques au dos. La tâche de manutention étudiée était séquentielle, et sa finalité (niveau de performance) consistait à empiler quatre caisses une par-dessus l'autre en s'assurant que l'empilement des caisses soit en équilibre, ou déposer une après l'autre les caisses sur un convoyeur. Le rapport de recherche a permis de :

- Proposer une méthode pour scruter à partir d'une signature gestuelle certaines couleurs de la variabilité motrice et de la diversité motrice adaptée aux besoins et aux conditions de la manutention de charge;
- Mesurer l'ampleur de la variabilité motrice d'une tâche séquentielle en manutention et préciser les effets des facteurs externes sur la variabilité motrice (p. ex. hauteur de soulèvement et de dépôt, masse);
 - o Effet Hauteur : La manutention de charge près du sol engendre, de manière générale, une réduction de la diversité et de la variabilité des modes opératoires. Les variations des chargements à L5/S1 normalisées ont augmenté au fur et à mesure que les charges manipulées se rapprochaient du sol.
 - o Effet Masse : L'augmentation de la masse a entraîné une diminution de la variabilité motrice et de la diversité motrice, peu importe la hauteur de manipulation de la charge. L'effet Masse a de plus engendré une augmentation nette de la sollicitation relative des structures musculosquelettiques du bas du dos et de ses variations.
 - o De manière globale, les experts hommes, ceux en surplus de poids et les manutentionnaires femmes se sont distingués de leurs comparses en adoptant des mouvements moins variables. Seuls les experts ont démontré une sélection de modes opératoires plus constants lorsque comparés aux participants hommes novices.
 - o Effet Expertise : Les chargements externes normalisés en asymétrie au dos des experts étaient 33 % inférieurs à ceux des manutentionnaires novices lorsque les caisses étaient déposées au sol seulement et les sollicitations musculosquelettiques au dos étaient plus constantes chez les experts comparativement aux novices.

- Différences interindividuelles au sein même des groupes de manutentionnaires,
- Les différences interindividuelles, dues à l'hétérogénéité marquée des participants constituant chacun des groupes de manutentionnaires (experts/novices hommes, ceux en surplus de poids et les manutentionnaires femmes), masquent potentiellement des effets marquants au niveau des préférences opératoires et la minimisation de certains coûts musculosquelettiques au bas du dos.
- Identifier les coûts des différents modes opératoires et faire ressortir les dimensions du compromis;
 - Trois variables clés de signature gestuelle qui expliquent beaucoup : Position des pieds, Posture du corps et Asymétrie.
 - Il n'y a pas de solution unique qui satisfait tous les critères de performance désirés : une phase de transition rapide, de faibles moments de force à L5/S1 en sagittal et en asymétrie, de faibles moments de forces aux genoux et un faible cumul des chargements lombaires.
 - Les deux tendances (technique sécuritaire, mode de transition directe) illustrent bien la notion du compromis : quand un risque est diminué, un autre est augmenté.
 - Il existe toutefois des modes opératoires plus performants que d'autres.
- Décortiquer la relation entre la variabilité motrice et les sollicitations musculosquelettiques au dos (coût lié à la préservation de la santé).
 - Proposition d'un modèle de classification selon les coûts initiaux et ses variations qui sépare les hypo- des hypersollicitations et les *Repeaters* des *Replacers*.
 - On y retrouve neuf paramètres discriminants qui se marient bien avec certaines règles d'action et qui intègrent la variation d'une répétition à une autre de la position et de l'orientation des pieds.
 - Quatre profils intéressants où l'on dénote certaines distinctions opératoires, mais au sein d'un même sous-groupe, on retrouve aussi des modes opératoires qui diffèrent parfois les uns des autres.

La variabilité motrice/diversité motrice, oui peut-être, mais à quel coût?

Chaque mode opératoire possède ses propres variations et ses coûts associés. Pour un même regroupement de coûts, on peut retrouver plusieurs modes opératoires différents. Des tendances centrales ont été identifiées. Par exemple, l'expertise est associée à une diversité motrice moindre, lorsque contrainte et à une variabilité motrice plus faible. Les coûts musculosquelettiques et ses variations sont généralement plus faibles aussi. Est-ce suffisant pour prévenir l'apparition d'un TMS ou est-ce qu'il est utile d'identifier le profil de l'individu dans un contexte de réadaptation et de réinsertion au travail?

Il est possible que d'autres variables ou combinaisons de variables puissent mieux caractériser la signature gestuelle et améliorer la capacité prédictive des problématiques de santé qui affligent un bon nombre de manutentionnaires. Notre proposition simplifiée n'est qu'un début. Ce rapport met également les bases sur les prérequis méthodologiques pour étudier plus en profondeur cette question. C'est en quelque sorte un plaidoyer en faveur de paradigmes expérimentaux plus substantiels en termes de nombre de participants et de répétitions à exécuter dans un contexte le plus réaliste possible.

D'autres parts, ces résultats nous confortent dans notre compréhension de l'individualité et du niveau de constance de nos modes opératoires. Il ne faut plus se mettre la tête dans le sable, la variabilité motrice est un trait individuel. Il faut nécessairement individualiser nos approches préventives et comprendre davantage cette individualisation.

Nos analyses insistent beaucoup sur les effets du travail sur la santé, sans évoquer l'effet réciproque de l'évolution de la santé, au fil d'un parcours professionnel, sur la variabilité gestuelle. La réciproque mérite une attention certaine.

Une avenue future à explorer consistera à établir la relation entre la variabilité motrice/diversité motrice en manutention et des facteurs personnels modifiables (p. ex. l'expérience, la formation spécifique). Est-ce que la variabilité motrice et la diversité motrice sont adaptables? L'idée est de guider l'apprenant afin de faciliter sa recherche de solutions, ses solutions. Un monde assez inconnu s'ouvre à nous, à savoir quelle façon et vers quelle zone de stabilité personnelle peut-on (ou veut-on) diriger l'apprenant?

Dans tous les cas, le jeu en vaut la chandelle, car la situation des manutentionnaires et leurs problématiques santé méritent qu'on s'y attarde pour y trouver de nouvelles solutions adaptées à leur activité de travail.

BIBLIOGRAPHIE

- Amirabdollahian, F., Loureiro, R. et Harwin, W. S. (2002). *Minimum jerk trajectory control for rehabilitation and haptic applications*. Communication présentée à l'International Conference on Robotics and Automation, Washington, DC (vol. 4, p. 3380-3385). doi: 10.1109/ROBOT.2002.1014233
- Arutyunyan, G. A., Gurfinkel, V. et Mirskii, M. L. (1968). Investigation of aiming at a target. *Biophysics*, 13(3), 642-645.
- 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. doi: 10.1080/10803548.1995.11076324
- Authier, M., Gagnon, M. et Lortie, M. (1996). Manual handling techniques: Comparing novices and experts. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 17(5), 419-429.
- Authier, M. et Lortie, M. (1993). Assessment of factors considered to be important in handling tasks by expert handlers. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 11(4), 331-340. doi: 10.1016/0169-8141(93)90083-P
- Ayoub, M. A. (1982). Control of manual lifting hazards: I. Training in safe handling. *Journal of Occupational Medicine*, 24(8), 573-577.
- Barrett, R., Noordegraaf, M. V. et Morrison, S. (2008). Gender differences in the variability of lower extremity kinematics during treadmill locomotion. *Journal of Motor Behavior*, 40(1), 62-70. doi: 10.3200/JMBR.40.1.62-70
- Bartlett, R., Wheat, J. et Robins, M. (2007). Is movement variability important for sports biomechanists? *Sports Biomechanics*, 6(2), 224-243. doi: 10.1080/14763140701322994
- Bazrgari, B., Shirazi-Adl, A. et Arjmand, N. (2007). Analysis of squat and stoop dynamic liftings: Muscle forces and internal spinal loads. *Eurean Spine Journal*, 16(5), 687-699. doi: 10.1007/s00586-006-0240-7
- Bernard, B. P. (Édit.) (1997). *Musculoskeletal disorders and workplace factors: A critical review of epidemiological evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back*. Cincinnati, OH: NIOSH.
- Bernstein, N. (1967). *The coordination and regulation of movement*. Londres, Angleterre: Pergamon Press.
- Brunet, M. et Riff, J. (2009). Analyse et exploitation de la variabilité gestuelle dans la prévention des TMS. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, 11(1). doi: 10.4000/pistes.2270
- 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.
- Burgess-Limerick, R. et Abernethy, B. (1997). Toward a quantitative definition of manual lifting postures. *Human Factors*, 39(1), 141-148. doi: 10.1518/001872097778940632
- Burgess-Limerick, R., Abernethy, B., Neal, R. J. et Kippers, V. (1995). Self-selected manual lifting technique: Functional consequences of the interjoint coordination. *Human Factors*, 37(2), 395-411. doi: 10.1518/001872095779064537
- Buseck, M., Schipplein, O. D., Andersson, G. B. 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. doi: 10.1097/00007632-198808000-00009
- Caroly, S. (2006). La prévention des troubles musculo-squelettiques en conception : quelles marges de manœuvre pour le déploiement de l'activité ? de Coutarel. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*. Tiré de <http://journals.openedition.org/pistes/3778>

- Chaffin, D. B., Gallay, L. S., Woolley, C. B. et Kuciamba, S. R. (1986). An evaluation of the effect of a training program on worker lifting postures. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1(2), 127-136.
- Chassaing, K. (2004). Vers une compréhension de la construction des gestuelles avec l'expérience : le cas des « tôleurs » d'une entreprise automobile. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, 6(1). doi: 10.4000/pistes.3280
- Chassaing, K. (2010). Les "gestuelles" à l'épreuve de l'organisation du travail : du contexte de l'industrie automobile à celui du génie civil. *Le travail humain*, 73(2), 163-192.
- Clot, Y. (2008). *Travail et pouvoir d'agir*. Paris, France: Presses Universitaires de France.
- Clot, Y. et Fernandez, G. (2005). Analyse psychologique du mouvement : apport à la compréhension des TMS. *Activités*, 2(2), 68-78.
- Corbeil, P., Plamondon, A., Handrigan, G., Vallée-Marcotte, J., Laurendeau, S., Ten Have, J. et Manzerolle, N. (2019). Biomechanical analysis of manual material handling movement in healthy weight and obese workers. *Applied Ergonomics*, 74, 124-133. doi: 10.1016/j.apergo.2018.08.018
- Corbeil, P., Plamondon, A., Teasdale, N. et Handrigan, G. A. (2013). *Biomechanical differences between obese and healthy-weight workers in manual materials handling*. Communication présentée à Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, San Diego, CA.
- Corbeil, P., Plamondon, A., Teasdale, N. et Handrigan, G. A. (2014). *Obésité et manutention : quels sont les défis pour l'ergonomie*. Communication présentée au 45^e congrès annuel de l'Association Canadienne d'Ergonomie, Montréal, QC.
- Corbeil, P., Plamondon, A., Teasdale, N., Handrigan, G., Ten Have, J. et Manzerolle, N. (2013). *Impacts biomécaniques et ergonomiques de la manutention chez les travailleurs obèses (Rapport n° R-781)*. Montréal, QC: IRSST. Tiré de <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-781.pdf>
- Côté, J. N. (2012). A critical review on physical factors and functional characteristics that may explain a sex/gender difference in work-related neck/shoulder disorders. *Ergonomics*, 55(2), 173-182. doi: 10.1080/00140139.2011.586061
- Coutarel, F. (2004). *La prévention des troubles musculo-squelettiques en conception : quelles marges de manœuvre pour le déploiement de l'activité?* (Thèse de doctorat, Université Victor Segalen - Bordeaux II, Bordeaux, France).
- Coutarel, F., Caroly, S., Vézina, N. et Daniellou, F. (2015). Marge de manœuvre situationnelle et pouvoir d'agir : des concepts à l'intervention ergonomique. *Le travail humain*, 78(1), 9-29.
- Cusumano, J. P. et Cesari, P. (2006). Body-goal variability mapping in an aiming task. *Biological Cybernetics*, 94(5), 367-379. doi: 10.1007/s00422-006-0052-1
- Daniellou, F. (2003). De la rotation sur les postes à la santé au travail. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, 5(2). doi: 10.4000/pistes.3319
- Davids, K., Glazier, P., Araujo, D. et Bartlett, R. (2003). Movement systems as dynamical systems: The functional role of variability and its implications for sports medicine. *Sports Medicine*, 33(4), 245-260. doi: 10.2165/00007256-200333040-00001
- Delignières, D., Teulier, C. et Nourrit, D. (2009). L'apprentissage des habiletés motrices complexes : des coordinations spontanées à la coordination experte. *Bulletin de Psychologie*, 502(4), 327-334.
- 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. doi: 10.1080/10803548.1996.11076347
- 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 L(5)/S(1) and

- knee joints. *Clinical Biomechanics*, 13(7), 506-514. doi: 10.1016/S0268-0033(98)00014-X
- Delisle, A., Gagnon, M. et Desjardins, P. (1999). Kinematic analysis of footstep strategies in asymmetrical lifting and lowering. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 23(5-6), 451-460.
- 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. doi: 10.1080/00140130210136044
- Denis, D., Lortie, M., St-Vincent, M., Gonella, M., Plamondon, A., Delisle, A. et Tardif, J. (2013). *Participatory training in manual handling: Theoretical foundations and proposed approach* (Rapport n° R-784). Montréal, QC: IRSST.
- Denis, D., Plamondon, A., St-Vincent, M., Gonella, M. et Lortie, M. (2013). *Principles that organize the movement when handling loads: For understanding the techniques used by handlers in real situations*. Communication présentée à la Eight International Conference on Prevention of Work-Related Musculoskeletal Disorders / PREMUS 2013, Busan, Corée du Sud (p. 482).
- Deutsch, K. M. et Newell, K. M. (2005). Noise, variability, and the development of children's perceptual-motor skills. *Developmental Review*, 25(2), 155-180. doi: 10.1016/j.dr.2004.09.001
- Durand, M., Geoffroi, V. et Jacquemond, L. (1993). Constance et stabilité des tâches, invariance des adaptations motrices et technique sportive. Dans J.-P. Famose (Édit.), *Cognition et performance* (p. 145-164). Paris, France: INSEP-Éditions.
- Durand, M. J., Vezina, N., Baril, R., Loisel, P., Richard, M. C. et Ngomo, S. (2009). Margin of manoeuvre indicators in the workplace during the rehabilitation process: A qualitative analysis. *Journal of Occupational Rehabilitation*, 19(2), 194-202. doi: 10.1007/s10926-009-9173-4
- Durand, M. J., Vezina, N., Baril, R., Loisel, P., Richard, M. C. et Ngomo, S. (2011). Relationship between the margin of manoeuvre and the return to work after a long-term absence due to a musculoskeletal disorder: An exploratory study. *Disability and Rehabilitation*, 33(13-14), 1245-1252. doi: 10.3109/09638288.2010.526164
- Enoka, R. M., Christou, E. A., Hunter, S. K., Komatz, K. W., Semmler, J. G., Taylor, A. M. et Tracy, B. L. (2003). Mechanisms that contribute to differences in motor performance between young and old adults. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 13(1), 1-12. doi: 10.1016/s1050-6411(02)00084-6
- Fineman, R. A. et Stirling, L. A. (2017). Quantification and visualization of coordination during non-cyclic upper extremity motion. *Journal of Biomechanics*, 63, 82-91. doi: 10.1016/j.jbiomech.2017.08.008
- Gagnon, M., Delisle, A. et Desjardins, P. (2002). Biomechanical differences between best and worst performances in repeated free asymmetrical lifts. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 29(2), 73-83.
- Gagnon, M., Plamondon, A. et Gravel, D. (1993). Pivoting with the load: An alternative for protecting the back in asymmetrical lifting. *Spine*, 18(11), 1515-1524.
- 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. doi: 10.1016/0021-9290(96)84540-4
- Garg, A. et Herrin, G. (1979). Stoop or squat: A biomechanical and metabolic evaluation. *A I I E Transactions*, 11(4), 293-302.

- Gaudez, C., Gilles, M. A. et Savin, J. (2016). Intrinsic movement variability at work: How long is the path from motor control to design engineering? *Applied Ergonomics*, 53 pt A, 71-78. doi: 10.1016/j.apergo.2015.08.014
- Ghezelbash, F., Shirazi-Adl, A., El Ouaid, Z., Plamondon, A. et Arjmand, N. (2020). Subject-specific regression equations to estimate lower spinal loads during symmetric and asymmetric static lifting. *Journal of Biomechanics*, 102. doi: 10.1016/j.jbiomech.2019.109550
- 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. doi: 10.1016/S0268-0033(99)00004-2
- Grood, E. S. et Suntay, W. J. (1983). A joint coordinate system for the clinical description of three-dimensional motions: Application to the knee. *Journal of Biomechanical Engineering*, 105(2), 136-144. doi: 10.1115/1.3138397
- Hagen, K. B. et Harms-Ringdahl, K. (1994). Ratings of perceived thigh and back exertion in forest workers during repetitive lifting using squat and stoop techniques. *Spine*, 19(22), 2511-2517. doi: 10.1097/00007632-199411001-00004
- Hagen, K. B., Harms-Ringdahl, K. et Hallen, J. (1994). Influence of lifting technique on perceptual and cardiovascular responses to submaximal repetitive lifting. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 68(6), 477-482. doi: 10.1007/BF00599516
- Hajihosseinali, M., Arjmand, N. et Shirazi-Adl, A. (2015). Effect of body weight on spinal loads in various activities: A personalized biomechanical modeling approach. *Journal of Biomechanics*, 48(2), 276-282. doi: 10.1016/j.jbiomech.2014.11.033
- Hamill, J., Palmer, C. et Van Emmerik, R. E. (2012). Coordinative variability and overuse injury. *Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation, Therapy & Technology*, 4(1). doi: 10.1186/1758-2555-4-45
- Hamill, J., van Emmerik, R. E., Heiderscheit, B. C. et Li, L. (1999). A dynamical systems approach to lower extremity running injuries. *Clinical Biomechanics*, 14(5), 297-308. doi: 10.1016/S0268-0033(98)90092-4
- Harari, Y., Bechar, A. et Riemer, R. (2020). Workers' biomechanical loads and kinematics during multiple-task manual material handling. *Applied Ergonomics*, 83. doi: 10.1016/j.apergo.2019.102985
- 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
- Hof, A. L. (1992). An explicit expression for the moment in multibody systems. *Journal of Biomechanics*, 25(10), 1209-1211. doi: 10.1016/0021-9290(92)90076-D
- Hogan, N. et Sternad, D. (2009). Sensitivity of smoothness measures to movement duration, amplitude, and arrests. *Journal of Motor Behavior*, 41(6), 529-534. doi: 10.3200/35-09-004-RC
- Hoozemans, M. J., 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. doi: 10.1080/00140130801958642
- James, C. R. (2004). Considerations of movement variability in biomechanics research. Dans N. Stergiou (Édit.), *Innovative analyses of human movement* (p. 223-258). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Kilbom, A. et Persson, J. (1987). Work technique and its consequences for musculoskeletal disorders. *Ergonomics*, 30(2), 273-279. doi: 10.1080/00140138708969706

- Kingma, I., Bosch, T., Bruins, L. et van Dieen, J. H. (2004). Foot positioning instruction, initial vertical load position and lifting technique: Effects on low back loading. *Ergonomics*, 47(13), 1365-1385. doi: 10.1080/00140130410001714742
- Kyriakopoulos, K. J. (1994). Minimum jerk for trajectory planning and control. *Robotica*, 12(2), 109-113. doi: 10.1017/S0263574700016696
- Latash, M. L. et Anson, J. G. (2006). Synergies in health and disease: Relations to adaptive changes in motor coordination. *Physical Therapy*, 86(8), 1151-1160. doi: 10.1093/ptj/86.8.1151
- 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., Li, Y. C., Andersson, G. B. 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. doi: 10.1080/001401399185838
- Lémonie, Y. (2019). Des marges de manœuvre à la diversité et à la variabilité motrice dans la prévention des TMS. *Le travail humain*, 82(1), 67-97. doi: 10.3917/th.821.0067
- Leplat, J. et Pailhous, J. (1981). L'acquisition des habiletés mentales : la place des techniques. *Le travail humain*, 44(2), 275-282.
- Lortie, M. (2002). Manutention : prise d'information et décision d'action. *Le travail humain*, 65(3), 193-216.
- Madeleine, P. et Madsen, T. M. (2009). Changes in the amount and structure of motor variability during a deboning process are associated with work experience and neck-shoulder discomfort. *Applied Ergonomics*, 40(5), 887-894. doi: 10.1016/j.apergo.2008.12.006
- Madeleine, P., Mathiassen, S. E. et Arendt-Nielsen, L. (2008). Changes in the degree of motor variability associated with experimental and chronic neck-shoulder pain during a standardised repetitive arm movement. *Experimental Brain Research*, 185(4), 689-698. doi: 10.1007/s00221-007-1199-2
- 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. doi: 10.1080/00140130801958659
- Marquié, J.-C. (1995). Changements cognitifs, contraintes de travail et expérience : les marges de manœuvre du travailleur vieillissant. Dans J.-C. Marquié, D. Paumès et S. Volkoff (Édit.), *Le travail au fil de l'âge* (p. 211-244). Toulouse, France: Octarès.
- Massion, J. (1994). Postural control system. *Current Opinion in Neurobiology*, 4(6), 877-887. doi: 10.1016/0959-4388(94)90137-6
- Mathiassen, S. E. (1993). The influence of exercise/rest schedule on the physiological and psychophysical response to isometric shoulder-neck exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 67(6), 528-539. doi: 10.1007/BF00241650
- Mathiassen, S. E. (2006). Diversity and variation in biomechanical exposure: What is it, and why would we like to know? *Applied Ergonomics*, 37(4), 419-427. doi: 10.1016/j.apergo.2006.04.006
- Mathiassen, S. E., Moller, T. et Forsman, M. (2003). Variability in mechanical exposure within and between individuals performing a highly constrained industrial work task. *Ergonomics*, 46(8), 800-824. doi: 10.1080/0014013031000090125
- Mathiassen, S. E. et Winkel, J. (1990). Electromyographic activity in the shoulder-neck region according to arm position and glenohumeral torque. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 61(5-6), 370-379. doi: 10.1007/BF00236055

- McGill, S. M. (1997). The biomechanics of low back injury: Implications on current practice in industry and the clinic. *Journal of Biomechanics*, 30(5), 465-475. doi: 10.1016/S0021-9290(96)00172-8
- McGill, S. M. (2002). *Low back disorders: Evidence-based prevention and rehabilitation*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Mirka, G. A. et Baker, A. (1996). An investigation of the variability in human performance during sagittally symmetric lifting tasks. *IIE Transactions*, 28(9), 745-752.
- 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 Academic Press.
- Newell, K. M. et Carlton, L. G. (1988). Force variability in isometric responses. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14(1), 37-44. doi: 10.1037/0096-1523.14.1.37
- Palmerud, G., Sporrang, H., Herberts, P. et Kadefors, R. (1998). Consequences of trapezius relaxation on the distribution of shoulder muscle forces: An electromyographic study. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 8(3), 185-193. doi: 10.1016/s1050-6411(97)00033-3
- Plamondon, A., Delisle, A., Bellefeuille, S., Denis, D., Gagnon, D. et Larivière, C. (2013). Lifting strategies of expert and novice workers during a repetitive palletizing task. *Applied Ergonomics*, 45(3), 471-481. doi: 10.1016/j.apergo.2013.06.008
- 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. Tiré de <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-663.pdf>
- Plamondon, A., Denis, D., Delisle, A., Larivière, C. et Salazar, E. (2010). Biomechanical differences between expert and novice workers in a manual material handling task. *Ergonomics*, 53(10), 1239-1253. doi: 10.1080/00140139.2010.513746
- 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. Tiré de <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-757.pdf>
- Plamondon, A., Gagnon, M. et Desjardins, P. (1996). Validation of two 3-D segment models to calculate the net reaction forces and moments at the L(5)/S(1) joint in lifting. *Clinical Biomechanics*, 11(2), 101-110. doi: 10.1016/0268-0033(95)00043-7
- Plamondon, A., Larivière, C., Delisle, A., Denis, D. et Gagnon, D. (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. doi: 10.1080/00140139.2011.634031
- Plamondon, A., Larivière, C., Denis, D., St-Vincent, M. et Delisle, A. (2014). Sex differences in lifting strategies during a repetitive palletizing task. *Applied Ergonomics*, 45(6), 1558-1569. doi: 10.1016/j.apergo.2014.05.005
- Potvin, J. R., McGill, S. M. et Norman, R. W. (1991). Trunk muscle and lumbar ligament contributions to dynamic lifts with varying degrees of trunk flexion. *Spine*, 16(9), 1099-1107. doi: 10.1097/00007632-199109000-00015
- Quéré, L. (1997). La situation toujours négligée? *Réseaux*, 85(5), 163-192.

- Riley, M. A., Santana, M. V. et Turvey, M. T. (2001). Deterministic variability and stability in detuned bimanual rhythmic coordination. *Human Movement Science*, 20(3), 343-369. doi: 10.1016/S0167-9457(01)00051-3
- Rohmert, W. (1973). Problems in determining rest allowances. Part 1: Use of modern methods to evaluate stress and strain in static muscular work. *Applied Ergonomics*, 4(2), 91-95. doi: 10.1016/0003-6870(73)90082-3
- Ryan, W., Harrison, A. et Hayes, K. (2006). Functional data analysis of knee joint kinematics in the vertical jump. *Sports Biomechanics*, 5(1), 121-138. doi: 10.1080/14763141.2006.9628228
- Salonikidis, K., Amiridis, I. G., Oxyzoglou, N., de Villareal, E. S., Zafeiridis, A. et Kellis, E. (2009). Force variability during isometric wrist flexion in highly skilled and sedentary individuals. *European Journal of Applied Physiology*, 107(6), 715-722. doi: 10.1007/s00421-009-1184-5
- Schipplein, O. D., Reinsel, T. E., Andersson, G. B. et Lavender, S. A. (1995). The influence of initial horizontal weight placement on the loads at the lumbar spine while lifting. *Spine*, 20(17), 1895-1898. doi: 10.1097/00007632-199509000-00010
- Schoner, G. (1995). Recent developments and problems in human movement science and their conceptual implications. *Ecological Psychology*, 7(4), 291-314. doi: 10.1207/s15326969eco0704_5
- Sherwood, D. E. et Schmidt, R. A. (1980). The relationship between force and force variability in minimal and near-maximal static and dynamic contractions. *Journal of Motor Behavior*, 12(1), 75-89. doi: 10.1080/00222895.1980.10735208
- Smithson, M. J. (2003). *Confidence intervals*. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications.
- Sparto, P. J., Parnianpour, M., Reinsel, T. E. et Simon, S. (1997). The effect of fatigue on multijoint kinematics, coordination, and postural stability during a repetitive lifting test. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 25(1), 3-12. doi: 10.2519/jospt.1997.25.1.3
- Srinivasan, D. et Mathiassen, S. E. (2012a). Motor variability: An important issue in occupational life. *Work*, 41, Suppl 1, 2527-2534. doi: 10.3233/WOR-2012-0493-2527
- Srinivasan, D. et Mathiassen, S. E. (2012b). Motor variability in occupational health and performance. *Clinical Biomechanics*, 27(10), 979-993. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2012.08.007
- St-Vincent, M., Vézina, N., Bellemare, M., Denis, D., Ledoux, É. et Imbeau, D. (2011). *L'intervention en ergonomie*. Québec, QC: Éditions Multimondes.
- St-Vincent, M., Vézina, N., Bellemare, M., Denis, D., Ledoux, É. et Imbeau, D. (2014). *Ergonomic intervention*. Montréal, QC: IRSST.
- Stergiou, N., Harbourne, R. et Cavanaugh, J. (2006). Optimal movement variability: A new theoretical perspective for neurologic physical therapy. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, 30(3), 120-129. doi: 10.1097/01.NPT.0000281949.48193.d9
- Straker, L. M. (2003). A review of research on techniques for lifting low-lying objects: 2. Evidence for a correct technique. *Work*, 20(2), 83-96.
- Straker, L. M., Stevenson, M. G. et Twomey, L. T. (1997). A comparison of risk assessment of single and combination manual handling tasks: 2. Discomfort, rating of perceived exertion and heart rate measures. *Ergonomics*, 40(6), 656-669. doi: 10.1080/001401397187955
- Svendsen, J. H. et Madeleine, P. (2010). Amount and structure of force variability during short, ramp and sustained contractions in males and females. *Human Movement Science*, 29(1), 35-47. doi: 10.1016/j.humov.2009.09.001
- Vallée-Marcotte, J., Muller, A., Robert-Lachaine, X., Fecteau, V., Denis, D., Plamondon, A. et Corbeil, P. (2021). New taxonomy for assessing manual material handlers' footstep patterns. *Applied Ergonomics*, 94. doi: 10.1016/j.apergo.2021.103424

- van Dieen, J. H., Creemers, M., Draisma, I., Toussaint, H. M. et Kingma, I. (1994). Repetitive lifting and spinal shrinkage, effects of age and lifting technique. *Clinical Biomechanics*, 9(6), 367-374. doi: 10.1016/0268-0033(94)90067-1
- van Dieen, J. H., Dekkers, J. J., Groen, V., Toussaint, H. M. et Meijer, O. G. (2001). Within-subject variability in low back load in a repetitively performed, mildly constrained lifting task. *Spine*, 26(16), 1799-1804. doi: 10.1097/00007632-200108150-00016
- van Dieen, J. H., Hoozemans, M. J. et Toussaint, H. M. (1999). Stoop or squat: A review of biomechanical studies on lifting technique. *Clinical Biomechanics*, 14(10), 685-696. doi: 10.1016/s0268-0033(99)00031-5
- van Dieen, J. H. et Toussaint, H. M. (1997). Evaluation of the probability of spinal damage caused by sustained cyclic compression loading. *Human Factors*, 39(3), 469-480. doi: 10.1518/001872097778827089
- 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. doi: 10.1080/00140130802376034
- Waters, T., Putz-Anderson, V. et Garg, A. (1994). *Applications manual for the revised NIOSH lifting equation*. Washington, DC: NIOSH.
- 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. doi: 10.1080/00140139308967940
- Westad, C., Westgaard, R. H. et De Luca, C. J. (2003). Motor unit recruitment and derecruitment induced by brief increase in contraction amplitude of the human trapezius muscle. *The Journal of Physiology*, 552(2), 645-656. doi: 10.1113/jphysiol.2003.044990

ANNEXE A : Classification des différentes stratégies de manutention en fonction de l'angle d'inclinaison du tronc et l'angle articulaire du genou

Les mouvements de manutention sont souvent définis en fonction de l'angle d'inclinaison du tronc et celui du genou au soulèvement de la charge (Straker, 2003). La méthode élaborée dans cette annexe utilise ces angles comme critères de classification. Celle-ci se base sur un ratio (postural index, PI) déterminé par Burgess-Limerick et Abernethy (1997) qui permet de définir quantitativement si le type de posture adopté lors d'une manutention ressemble davantage à un 'Stoop' ou un 'Squat'. Une posture en 'Stoop' correspondrait à un PI près de 0 alors qu'une posture de squat correspondrait à un PI près de 1. L'équation du PI (équation 4) requiert la connaissance de quatre paramètres (variables d'entrée) : l'angle articulaire lombaire (θ_l), l'angle articulaire à la hanche (θ_h), l'angle articulaire au genou (θ_k), et l'angle articulaire à la cheville (θ_a) (figure 14).

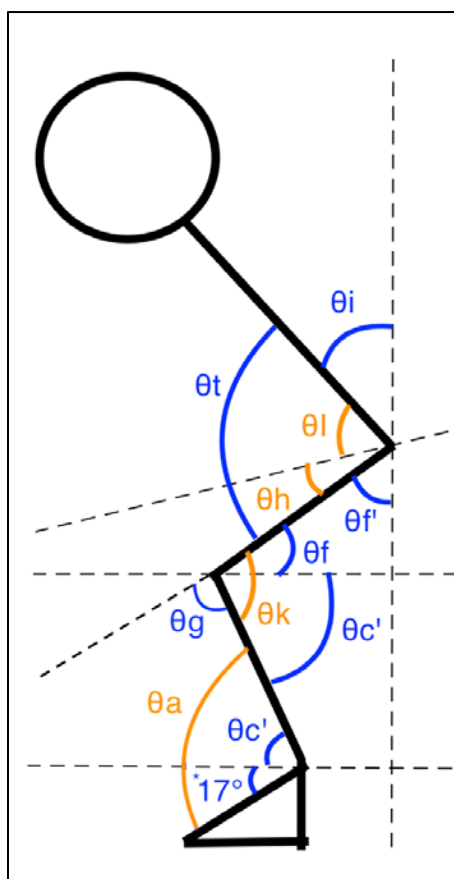


Figure 14. Définition des angles utilisés dans l'équation de Burgess-Limerick et Abernethy (1997) (en orange) et définition des angles utilisés dans la procédure de classification (en bleu).

L'équation du PI se décline ainsi :

$$\text{Postural index (PI)} = \frac{\theta_{kns} - \theta_k}{(\theta_{ans} - \theta_a) + (\theta_{tns} - \theta_t)} \quad (4)$$

où, θ_{kns} représente la valeur de l'angle au genou en posture neutre érigée ($\theta_{kns} = 180^\circ$), θ_{ans} et θ_{tns} représentent la valeur de l'angle articulaire à la cheville et lombaire dans cette même position ($\theta_{ans} = 107^\circ$ et $\theta_{tns} = 180^\circ$, respectivement).

L'équation 4 a ensuite été transformée afin de mettre en relation le PI à seulement deux variables d'entrée soit l'angle d'inclinaison du tronc par rapport à la verticale (θ_i) et l'angle du genou par rapport au prolongement de la cuisse (θ_g) (figure 14). Le choix de ces deux angles permet de classer la position neutre en posture debout par rapport au point (0,0).

Comme θ_c représente un inconnu, cet angle a été défini en fonction de θ_k selon les fonctions linéaires (5), (6) et (7). Ces fonctions ont été bâties à partir des données empiriques d'angles rapportés par l'étude de Burgess-Limerick et Abernethy (1997) pour les positions en 'Stoop' et en 'Squat'. Il a aussi été établi que θ_c ne pouvait plus diminuer à partir de $\theta_k = 65^\circ$. Il a été considéré qu'en position neutre, l'angle de la jambe était de 90° par rapport à l'horizontale (θ_c'). Comme Burgess-Limerick et Abernethy définissent l'angle de la cheville (θ_c) comme étant 107° en position neutre, il a été établi que l'angle entre l'axe horizontal et le dessus du pied serait constant à 17° peu importe la position.

$$\theta_k [0, 65], \quad \theta_c = 75 \quad (5)$$

$$\theta_k [65, 160], \quad \theta_c = 0,3684 \times \theta_k + 51,0530 \quad (6)$$

$$\theta_k [160, 180], \quad \theta_c = -\theta_k + 270 \quad (7)$$

L'angle θ_t , représentant la somme de l'angle articulaire lombaire (θ_l) et l'angle articulaire à la hanche (θ_h), a été défini en fonction de θ_k via l'équation (1).

$$\theta_t = \frac{-\theta_{kns} + \theta_k}{PI} + \theta_{cns} + \theta_c + \theta_{tns} \quad (8)$$

L'angle d'inclinaison du tronc rapport à la verticale (θ_i) a été défini à partir des angles de la figure 14 et de l'équation (8).

$$\theta_i = 107^\circ + \theta_k - \theta_t - \theta_c \quad (9)$$

$$\theta_i = \left(\frac{1}{PI} - 1\right) \times \theta_g \quad (10)$$

Les équations 9 et 10 sont des fonctions linéaires qui permettent de séparer la posture en 'Stoop' de celle en 'Demi-squat' et celle en 'Demi-squat' du 'Squat' (figure 2). Les PI de 0,35 et 0,7 ont été déterminés de manière empirique afin que l'angle d'inclinaison du tronc et l'angle du genou pour les 3 différentes positions telles que définies dans l'étude de Straker (Straker, 2003) se retrouvent dans les bonnes zones prédéfinies. Ces zones sont d'ailleurs illustrées sur la figure 15.

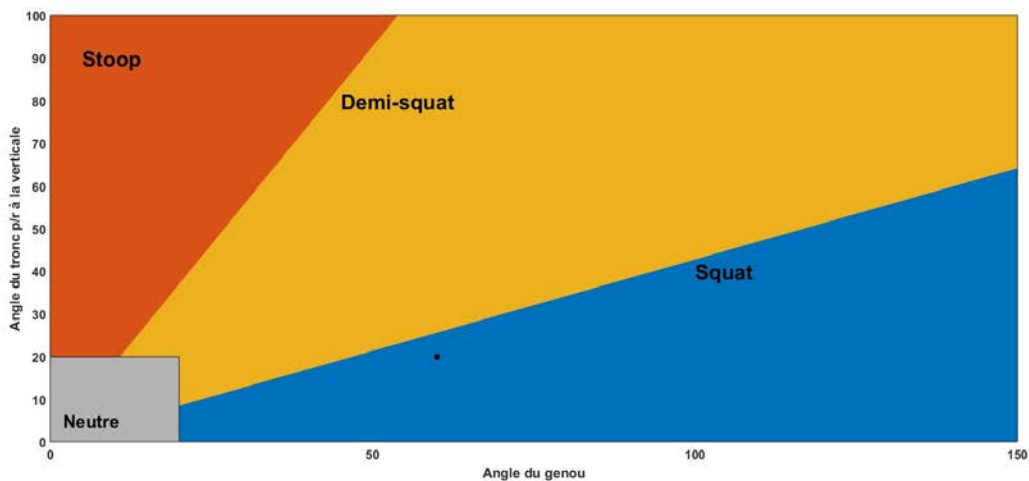


Figure 15. Classification des différentes stratégies posturales de manutention en fonction de l'angle d'inclinaison du tronc (θ_i) et l'angle du genou (θ_g).

Note : Par exemple, une combinaison d'angle au genou de 60 °et d'inclinaison du tronc par rapport à la verticale de 20 °est identifié comme une posture en 'Squat' tel qu'illustré par le point en noir sur la figure.

ANNEXE B

B.I En complément à la section sur la signature gestuelle (soulèvement)

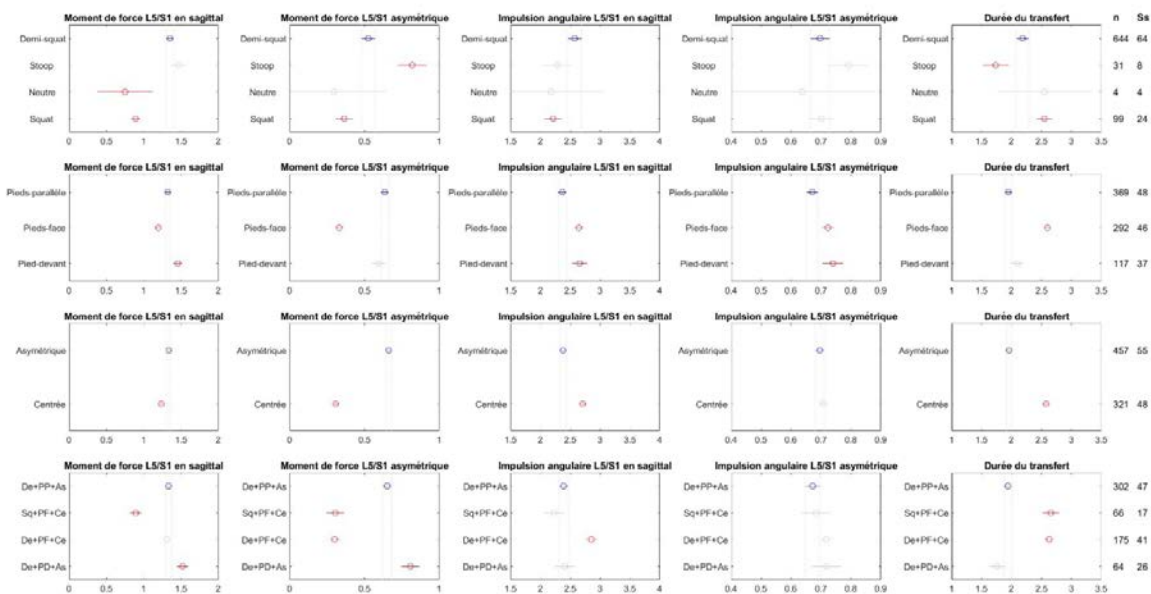


Figure 16. Comparaison des moyennes des différentes catégories ou combinaisons de catégories de trois paramètres de la signature gestuelle de la tâche du diable au convoyeur (retour) – Soulèvement d’une caisse de 15 kg d’une hauteur intermédiaire haute (H3).

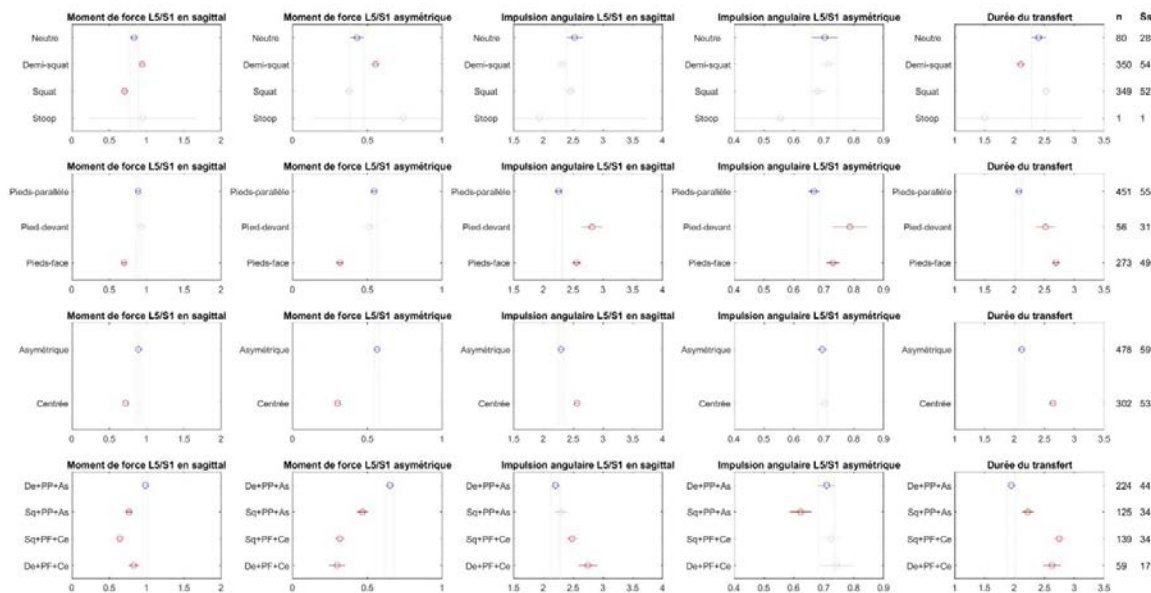


Figure 17. Comparaison des moyennes des différentes catégories ou combinaisons de catégories de trois paramètres de la signature gestuelle de la tâche du diable au convoyeur (retour) – Soulèvement d’une caisse de 15 kg d’une hauteur haute (H4).

B.II En complément à la section sur la signature gestuelle (dépôt)

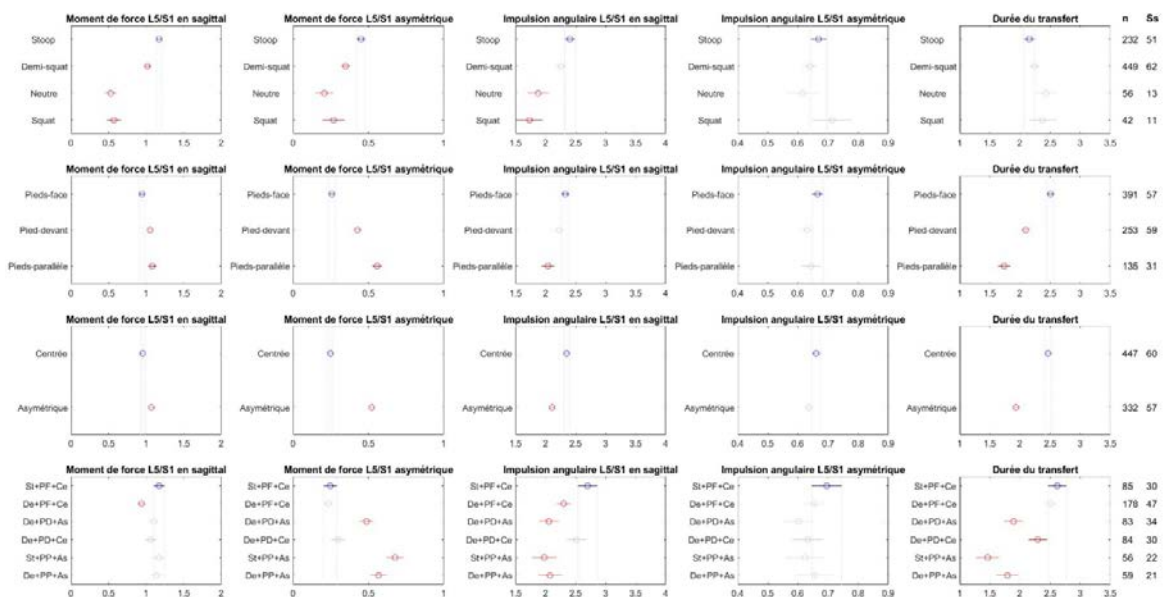


Figure 18. Comparaison des moyennes des différentes catégories ou combinaisons de catégories de trois paramètres de la signature gestuelle de la tâche du convoyeur au diable (aller) – Dépôt d’une caisse de 15 kg à une hauteur intermédiaire haute (H3).

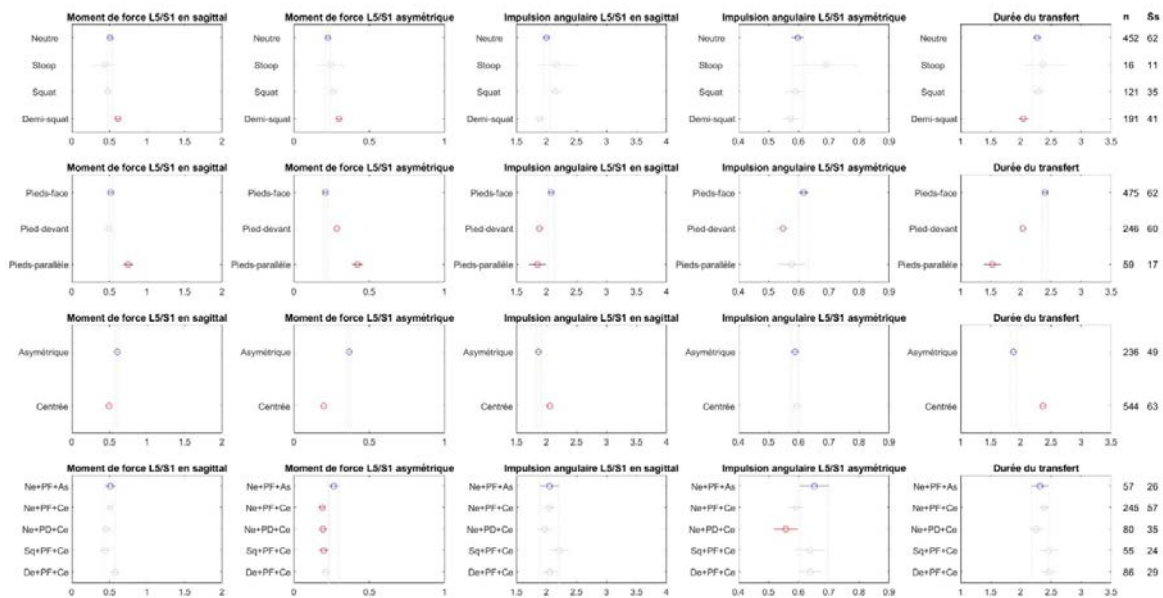


Figure 19. Comparaison des moyennes des différentes catégories ou combinaisons de catégories de trois paramètres de la signature gestuelle de la tâche du convoyeur au diable (aller) – Dépôt d’une caisse de 15 kg à une hauteur haute (H4).

ANNEXE C

C.I En complément à la section sur la classification en sous-groupes

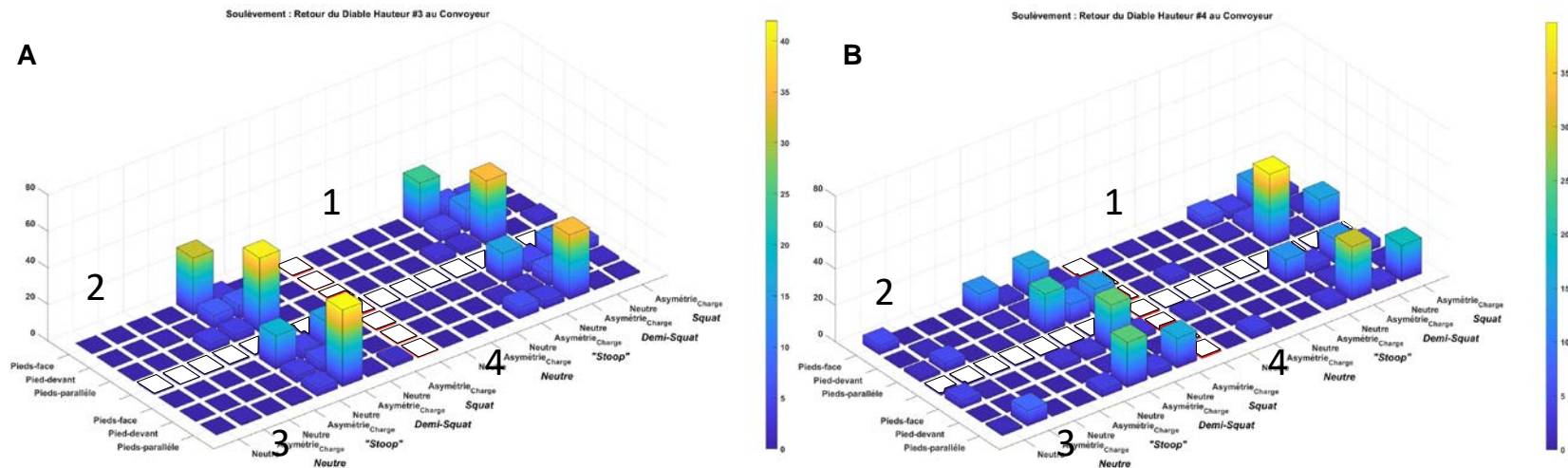


Figure 20. Pourcentage d’occurrence des combinaisons de paramètres de la signature par sous-groupe pour la condition diable au convoyeur, soit durant le soulèvement des caisses: (A) H3 – hauteur intermédiaire haute et (B) H4 – hauteur haute.

Note : (1) le sous-groupe Hypersollicitation Replacer; (2) le sous-groupe Hypersollicitation Repeater; (3) le sous-groupe Hyposollicitation Repeater; (4) le sous-groupe Hyposollicitation Replacer. L’axe vertical des figures représente le pourcentage d’occurrence. La légende du code couleur est présentée à la droite de chaque figure. Les trois paramètres de la signature sont la posture du corps (Neutre, ‘Stoop’, Demi-Squat, Squat), position des pieds (Pieds-face, Pied-devant, Pieds-parallèle) et asymétrie de charge (Neutre/Centrée, Asymétrie de charge). Les combinaisons de paramètres de chaque sous-groupe sont délimitées par les cases en blanc.

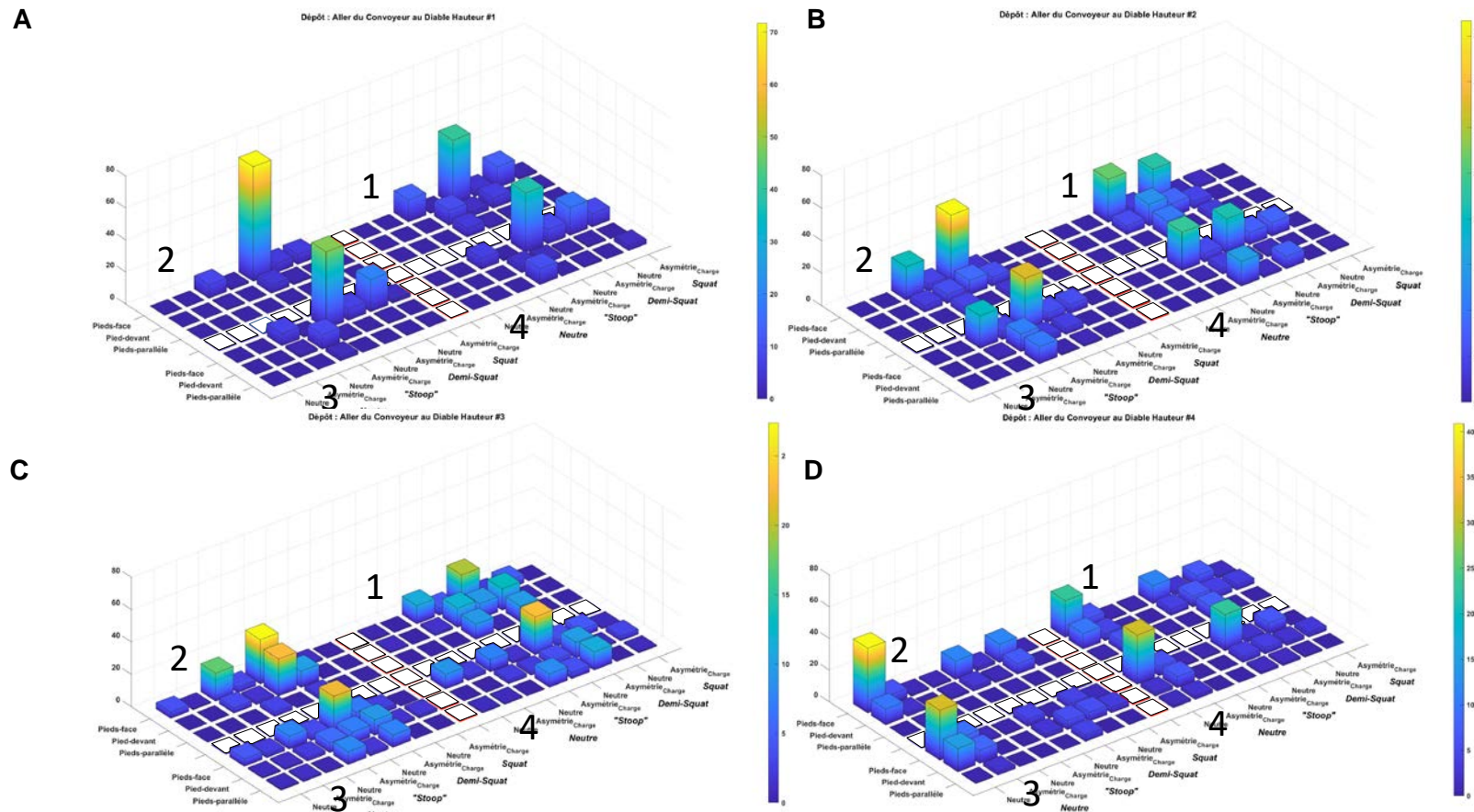


Figure 21. Pourcentage d’occurrence des combinaisons de paramètres de la signature par sous-groupe pour la condition convoyeur au diable, soit durant le dépôt des caisses: (A) H1-sol; (B) H2 – hauteur intermédiaire basse; (C) H3 – hauteur intermédiaire haute; (D) H4 – hauteur haute.

Note : (1) le sous-groupe Hypersollicitation Replacer; (2) le sous-groupe Hypersollicitation Repeater; (3) le sous-groupe Hyposollicitation Repeater; (4) le sous-groupe Hyposollicitation Replacer. L’axe vertical des figures représente le pourcentage d’occurrence. La légende du code couleur est présentée à la droite de chaque figure. Les trois paramètres de la signature sont la posture du corps (Neutre, ‘Stoop’, Demi-Squat, Squat), position des pieds (Pieds-face, Pied-devant, Pieds-parallèle) et asymétrie de charge (Neutre/Centree, Asymétrie de charge). Les combinaisons de paramètres de chaque sous-groupe sont délimitées par les cases en blanc.

C.II Signature gestuelle de deux participants : sommaire des huit conditions

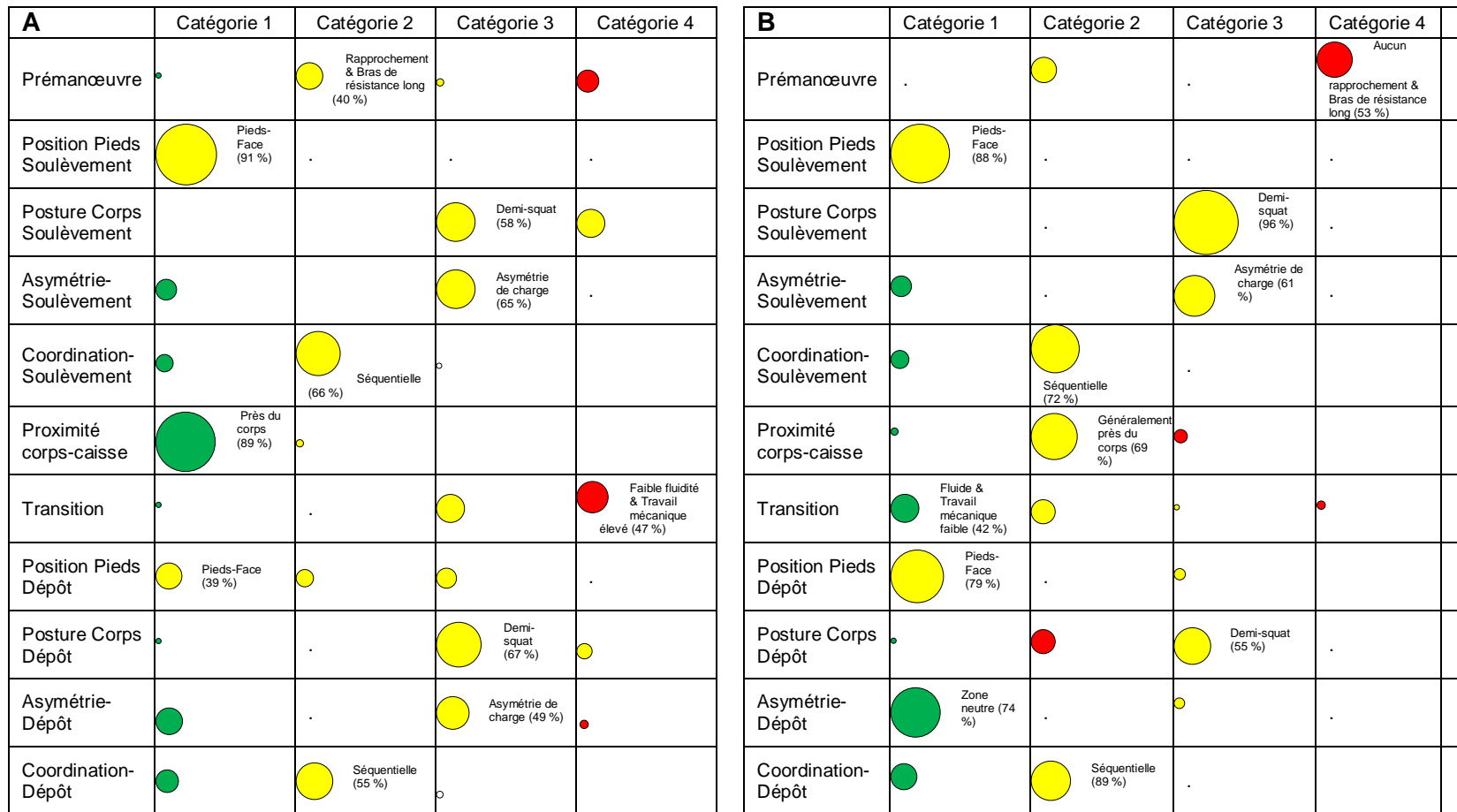


Figure 22. Sommaire de la signature gestuelle de deux participants (A. Expert-homme-poids santé; B. Novice-homme-poids santé).

Note : Chaque rangée représente un des onze paramètres de la signature et chaque colonne ses catégories. Un disque de couleur est inséré dans chaque combinaison paramètre-catégorie et son diamètre représente le pourcentage d'essais, parmi les 96 essais impliquant un transfert de caisses de 15 kg, où le mode

opérateur a été observé. La couleur du disque est associée au niveau de risque du mode opératoire : en vert, le mode opératoire serait sécuritaire, en rouge, le mode opératoire serait moins sécuritaire, et en jaune, neutre. La catégorie la plus fréquemment observée par paramètre est détaillée.