

1997

Évaluation biomécanique de stratégies distinguant les travailleurs experts et novices

Micheline Gagnon
Université de Montréal

Alain Delisle

Suivez ce contenu et d'autres travaux à l'adresse suivante: <https://pharesst.irsst.qc.ca/rapports-scientifique>

Citation recommandée

Gagnon, M. et Delisle, A. (1997). *Évaluation biomécanique de stratégies distinguant les travailleurs experts et novices* (Rapport n° R-151). IRSST.

Ce document vous est proposé en libre accès et gratuitement par PhareSST. Il a été accepté pour inclusion dans Rapports de recherche scientifique par un administrateur autorisé de PhareSST. Pour plus d'informations, veuillez contacter pharesst@irsst.qc.ca.

**Évaluation biomécanique
de stratégies distinguant
les travailleurs experts
et novices**

**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

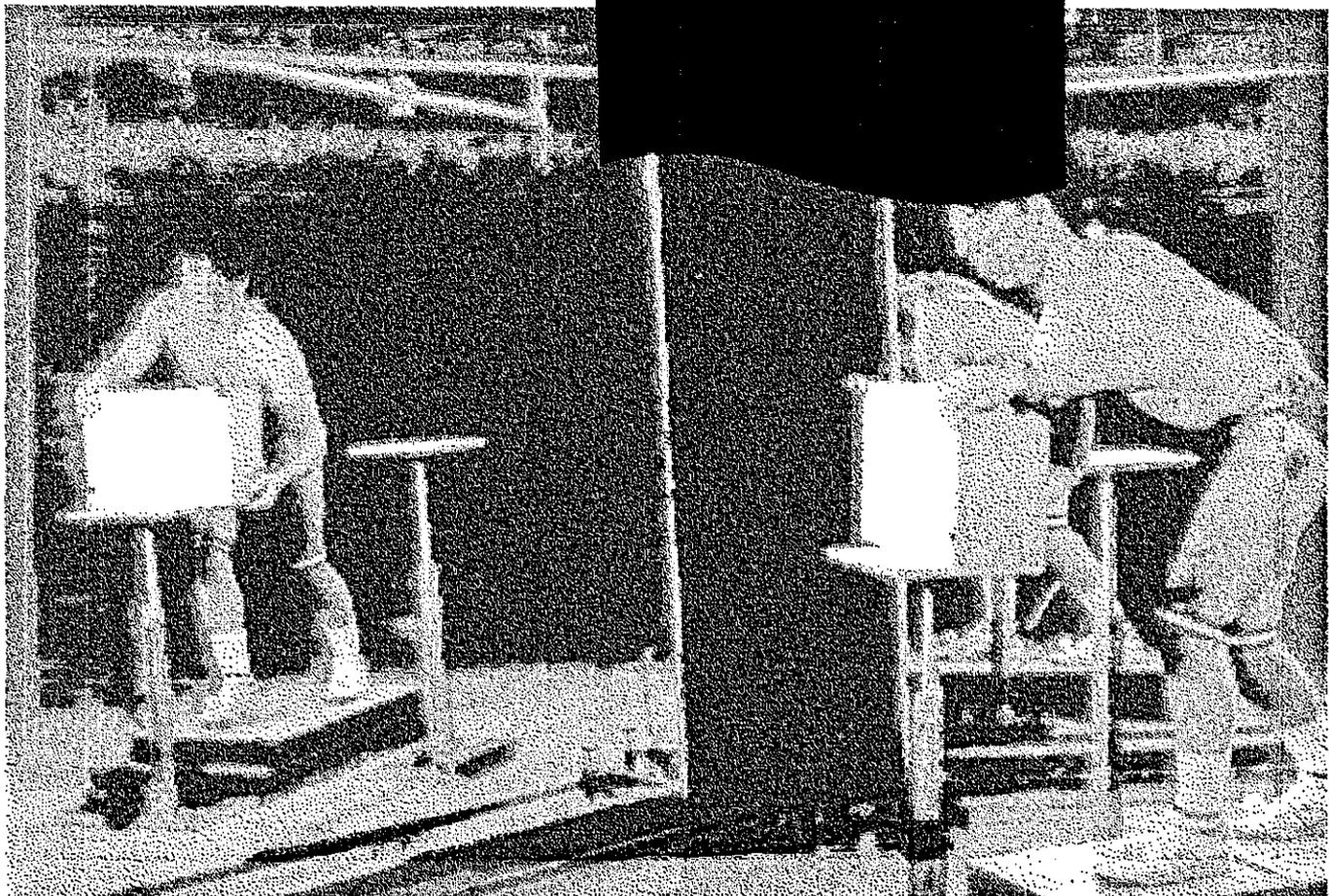
Micheline Gagnon

Alain Delisle

Février 1997

R-151

RAPPORT



IRSST
Institut de recherche
en santé et en sécurité
du travail du Québec

La recherche, pour mieux comprendre

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

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

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

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

ATTENTION

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

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec

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

**Évaluation biomécanique
de stratégies distinguant
les travailleurs experts
et novices**

**Micheline Gagnon
Université de Montréal
Alain Delisle**

**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

RAPPORT

ÉVALUATION BIOMÉCANIQUE DE STRATÉGIES DE MANUTENTION DISTINGUANT LES TRAVAILLEURS EXPERTS ET NOVICES

Résumé

PROBLÉMATIQUE DE SANTÉ ET SÉCURITÉ ET PERTINENCE DU PROJET

Nos travaux antérieurs de recherche ont porté sur l'étude des caractéristiques d'exécution de tâches qui distinguaient les travailleurs experts des travailleurs novices, par des méthodes biomécaniques et ergonomiques. Les résultats avaient alors clairement mis en évidence l'adoption de modes d'action différents par ces deux groupes de travailleurs: d'abord les types de manoeuvre sur la charge (types de prises et d'inclinaisons du contenant) et ensuite les types de placement et déplacement de pieds. De nouvelles questions ont donc surgi à la suite de ces résultats. Il devenait important de comprendre si ces modes d'action comportaient des risques ou au contraire optimisaient la réalisation sécuritaire des tâches de manutention. Une évaluation globale biomécanique a donc été entreprise, soit l'examen des chargements articulaires (dos, genoux), de l'asymétrie de posture, de l'équilibre et des dépenses d'énergie. Ce projet s'inscrit dans les priorités de l'IRSST puisqu'il poursuit deux des objectifs importants pour la réduction des accidents de travail: la détection de stratégies sécuritaires pour le dos dans les tâches de travail et le développement d'outils de prévention. Un autre objectif porte sur la formation des travailleurs.

MÉTHODOLOGIE

Des méthodes biomécaniques ont permis l'analyse cinématique (description du mouvement) et cinétique (caractérisation des forces internes et externes), tridimensionnelle de tâches de manutention asymétriques. Les chargements articulaires ont été évalués en déterminant les moments musculaires nets autour des trois axes anatomiques de rotation pour l'articulation lombo-sacrée du dos et pour les genoux; les variables importantes à examiner étaient le moment (ou effort) maximum au cours de la tâche et le taux d'utilisation musculaire (ou pourcentage que représente les efforts pendant la tâche par rapport à l'effort maximum, cet effort maximum étant lui-même évalué par dynamométrie et par des équations de régression). L'équilibre dynamique a aussi été évalué afin de quantifier les conditions de stabilité associées aux stratégies de mouvement analysées. Enfin, le travail mécanique a été évalué pour déterminer les niveaux d'exigences énergétiques associées aux tâches. Les outils d'analyse comprennent un système optique de quatre caméras vidéos synchronisées entre elles, quatre enregistreuses FM et deux plates-formes de forces.

Les études ont été entreprises avec un total de 21 sujets considérés comme des novices dans la manutention, i.e. que leur expérience était limitée. Ces sujets devaient reproduire des modes d'action imposées (tâches expérimentales) après une période d'entraînement. Quatre expériences ont été réalisées pour répondre aux questions suivantes: a) une stratégie de peu de flexion des genoux (typique des experts) est-elle plus sécuritaire qu'une stratégie avec grande flexion des genoux (typique des novices) pour un lever asymétrique? La largeur de base d'appui influence-t-elle alors ce facteur? b) De plus, est-ce que l'adoption simultanée d'une inclinaison de la charge vers le travailleur avec une flexion peu prononcée des genoux (typique des experts) s'avère plus sécuritaire que l'adoption d'une flexion prononcée des genoux avec absence d'inclinaison de la charge (typique des novices) dans une condition de lever symétrique (un seul plan)? c) Des stratégies de prises manuelles impliquant des inclinaisons de la charge (typiques des experts) sont-elles plus sécuritaires que la stratégie impliquant aucune inclinaison de la charge (typique des novices)? d) Enfin, est-ce qu'une stratégie impliquant une mobilité des pieds (par pivotement alternatif sur chaque pied) est plus sécuritaire que des stratégies où les pieds demeurent fixes?.

Dans le lever asymétrique, la stratégie d'experts impliquant une flexion réduite des genoux présente un meilleur potentiel de sécurité car elle est associée à une réduction des efforts asymétriques au dos et à une augmentation des fléchisseurs des genoux qui eux présentent une action potentielle de stabilisation du bassin; cette augmentation des fléchisseurs aux genoux se fait aux dépens d'une diminution des extenseurs des genoux responsables des contraintes au niveau de la rotule (impliqués dans le syndrome fémoro-rotulien); la réduction de l'amplitude du mouvement des genoux avec cette stratégie suggère aussi une minimisation des dépenses énergétiques; cependant, la stabilité est un peu moins grande avec cette stratégie. La largeur de base est un facteur qui n'influence que la stabilité: une stratégie optimale serait donc l'utilisation des genoux peu fléchis combinée avec une base large. Lorsque cette stratégie de peu flexion des genoux fut examinée en combinant l'inclinaison de la charge vers soi pour faciliter la prise et le dépôt et en la comparant à la stratégie de novices (genoux très fléchis et absence d'inclinaison de la charge), le potentiel de la stratégie d'experts ressort encore plus nettement: dans ce cas, il y a une minimisation du parcours (longueur et durée) où la charge est entièrement supportée par le travailleur, une réduction des efforts au dos, aux genoux ainsi qu'aux membres supérieurs, une réduction des dépenses énergétiques et la stabilité n'est que faiblement affectée; le désavantage c'est l'augmentation du temps de réalisation de la tâche. C'est le facteur flexion de jambes qui influence le plus mais l'inclinaison de la boîte présente une influence non négligeable sur les variables biomécaniques.

En ce qui concerne les types de prises couplées aux inclinaisons des charges, les résultats n'ont pas permis de mettre en évidence un mode optimal d'exécution pour des levers asymétriques. Une observation plus poussée des données ergonomiques (projet antérieur) permet de poser de nouvelles questions: en effet, c'est vers le couplage des inclinaisons (avant/latérale/horizontale) de charge qu'il faut orienter la recherche: les inclinaisons unidirectionnelles (telles qu'examinées dans notre projet) ne sont pas fréquentes. C'est un problème complexe car il y a en plus une association avec les types de prises.

En ce qui concerne le facteur mobilité de déplacement des pieds, notre hypothèse était que le mouvement des pieds pourrait réduire les efforts asymétriques au dos et aux genoux ainsi que l'asymétrie de posture. Les résultats ne mettent pas clairement en évidence l'avantage du pivot alternatif. C'est en fait la stratégie des genoux peu fléchis avec pieds fixes qui semble optimale (effet discuté ci-haut). On soupçonne que cette stratégie de pivot alternatif n'est peut-être pas adéquate dans ce contexte d'espace restreint. Il y a probablement lieu de s'attarder à d'autres types de stratégie de déplacement, tels les pas latéraux, croisés, antéro-postérieurs.

RETOMBÉES ESCOMPTÉES

La confrontation des modes opératoires sélectionnés par des travailleurs experts à ceux de novices est une approche tout à fait originale et une avenue qui devrait permettre de comprendre quels sont les facteurs qui sont optimisés par une longue expérience de travail. Cette compréhension devrait aussi nous amener à mieux comprendre les processus mis en cause pour réduire les risques de blessures et optimiser les manutentions sécuritaires. Nous nous basons sur la prémisse que des travailleurs experts (peu blessés, longue expérience) possèdent des stratégies qui contiennent des éléments de solution quant à la manutention sécuritaire. Une retombée consiste aussi à alimenter en informations pertinentes les responsables en ergonomie du programme de formation des travailleurs manutentionnaires. Il y a pourtant lieu d'insister sur le fait que cette problématique est extrêmement complexe et multifactorielle et que les solutions sont très dépendantes des contextes de travail.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
MÉTHODOLOGIE	1
a) Sujets	1
b) Tâches	1
Stratégies de flexion des genoux et de base d'appui.....	1
Stratégies de prises manuelles et d'inclinaisons des boîtes.	2
Stratégies de mobilité des pieds.	2
Stratégies combinées d'inclinaison de charge et de flexion des genoux.....	2
c) Techniques	3
d) Méthodes	3
e) Traitements statistiques.....	4
RÉSULTATS.....	4
a) Stratégies de flexion des genoux et de base d'appui	4
b) Stratégies de prises manuelles et d'inclinaisons de boîte.....	5
c) Stratégies de mobilité des pieds.....	5
d) Stratégies combinées de flexion des genoux et d'inclinaison (ou pivot) de charge (lever symétrique).....	6
Cinématique	6
Cinétique: Moments musculaires et chargements lombaires maxima	7
Cinétique: Travail mécanique	7
DISCUSSION.....	7
a) Des stratégies de flexion des genoux.....	7
b) Des stratégies de prises manuelles et d'inclinaisons de boîte.....	8
c) Des stratégies de mobilité des pieds	10
d) Des stratégies combinées d'inclinaison (ou pivot) de charge et de flexion des genoux.....	10
CONCLUSIONS	11
RETOMBÉES ESCOMPTÉES.....	12
BIBLIOGRAPHIE.....	13

TABLEAUX

Tableau 1.....	15
Tableau 2.....	16
Tableau 3.....	17
Tableau 4.....	18
Tableau 5.....	19
Tableau 6.....	20
Tableau 7.....	21
Tableau 8.....	22
Tableau 9.....	23
Tableau 10.....	24
Tableau 11.....	25
Tableau 12.....	26
Tableau 13.....	27
Tableau 14.....	28

FIGURES

Figure 1.....	29
Figure 2.....	30
Figure 3.....	31
Figure 4.....	32

INTRODUCTION

Nos derniers travaux de recherche ont porté sur l'étude des caractéristiques d'exécution de tâches qui distinguaient les travailleurs experts des travailleurs novices par des méthodes biomécaniques et ergonomiques. Les résultats ont clairement mis en évidence l'adoption de modes d'action différents par ces deux groupes de travailleurs: d'abord les types de manoeuvre sur la charge et ensuite les déplacements des pieds. De nouvelles questions ont donc surgi à la suite de ces résultats. Nous désirons comprendre si ces modes d'action comportent des risques ou au contraire optimisent la réalisation sécuritaire des tâches de travail.

Les hypothèses suivantes ont été soumises à vérification expérimentale:

- a) Les types de manoeuvres mains/charge (types de prises manuelles et types d'inclinaison de la charge) à la saisie (ou à la prise), pendant le transport et au dépôt qui sont typiques des modes opératoires des travailleurs experts sont mécaniquement plus efficaces et plus sécuritaires par rapport aux modes opératoires de travailleurs novices.
- b) Les types de déplacements des pieds au cours de la manutention qui sont typiques des modes opératoires de travailleurs experts sont mécaniquement plus efficaces et plus sécuritaires par rapport aux modes opératoires de travailleurs novices.

MÉTHODOLOGIE

a) Sujets

Un total de 21 sujets ont été utilisés pour les différentes phases du projet. Il s'agissait d'étudiants en éducation physique considérés comme des novices en manutention. Pour trois des quatre expériences, 14 sujets ont participé alors que pour la quatrième, un groupe plus restreint de sept sujets a été utilisé. Le groupe de 14 sujets avait une expérience de manutention dans des emplois divers qui variait de trois à 14 mois. Leur âge moyen était 21,1 ans (étendue: 19-23 ans), leur masse 76,9 kg (étendue: 65,9 - 88,2 kg) et leur taille 1,78 m (étendue: 1,65-1,86 m). Leur capacité musculaire maximale du tronc telle que mesurée par dynamométrie pour des contractions volontaires maximales isométriques était comme suit: les extenseurs du dos, 403 Nm (étendue: 258-556 Nm), les rotateurs droits, 155 Nm (étendue: 93-244 Nm) et les fléchisseurs latéraux droits, 238 Nm (étendue: 123-326 Nm). Pour le groupe de sept sujets, l'âge moyen était 22,7 ans (étendue: 21-28 ans), leur poids, 71,1 kg (étendue: étendue 59,9-84,5 kg) et leur taille 1,78 m (étendue: 1,67-1,90 m). Les caractéristiques de force ne furent pas mesurées pour ce dernier groupe de sujets.

b) Tâches

Pour les trois premières expériences, une boîte de 12 kg sans poignées fut manipulée. Il s'agissait de la déplacer d'une étagère à 16 cm du sol, face au sujet, jusqu'à une autre étagère placée à gauche du sujet et à une même hauteur de 16 cm (lever asymétrique). Pour la quatrième étude, une même charge de 12 kg fut levée: la prise était effectuée d'une hauteur près du sol devant le sujet jusqu'à une hauteur de 67 cm sur une tablette aussi face au sujet (lever dans un seul plan). Les tâches expérimentales sont décrites ci-dessous.

Stratégies de flexion des genoux et de base d'appui. Les prises sur la boîte furent standardisées: la main droite sur le coin droit arrière supérieur et la main gauche sur le coin diagonalement opposé (Figure 1). Le sujet devait incliner la boîte du côté droit pour le transfert de façon à amener les mains à la même hauteur. Le dépôt se faisait sur le côté de la

boîte. Les positions des pieds furent standardisées. Le sujet devait effectuer quatre tâches de transfert avec différentes combinaisons de flexion de genoux (Figure 2) et de largeur de base d'appui: avec les genoux très fléchis en utilisant deux bases d'appui, l'une large, l'autre étroite; avec les genoux légèrement fléchis en utilisant les deux mêmes bases d'appui, large et étroite. Les angles maxima des genoux furent de 71° (large flexion) et de 33° (faible flexion) et les bases, de 57 cm et de 41 cm.

Stratégies de prises manuelles et d'inclinaisons des boîtes. Les tâches furent exécutées avec la même position des pieds, assez large (57 cm) et une importante flexion des genoux (près de 50°). Trois des tâches s'effectuaient avec les mains sur les coins diagonalement opposés: la main droite sur le coin droit arrière supérieur et la main gauche sur le coin gauche avant inférieur (prises 3/7, Figure 3). La distinction entre les tâches s'opéra par l'inclinaison de la boîte durant la manutention résultant en trois types différents de dépôt: pour la première, il n'y avait aucune inclinaison (technique à plat: Figure 4A), la boîte était maintenue parallèle au sol et le dépôt s'effectuait à plat; la seconde était représentée par une inclinaison arrière (technique d'inclinaison arrière: Figure 4B) ou vers le sujet résultant en un dépôt sur le côté avant inférieur de la boîte; la troisième consistait en une inclinaison latérale droite (technique d'inclinaison à droite: Figure 4C) résultant en un dépôt sur le côté droit inférieur de la boîte. Finalement, pour une quatrième tâche, il y avait un autre type de prise impliquée résultant en un autre type d'inclinaison de la boîte pour le dépôt: la boîte était inclinée sur le côté gauche (technique d'inclinaison à gauche: Figure 4D) avec la main droite placée sur le milieu de l'arête inférieur droite et la main gauche sur le milieu de l'arête supérieure gauche (prises 8/2 selon Figure 3). Le dépôt s'effectuait sur l'arête inférieure gauche de la boîte.

Stratégies de mobilité des pieds. Les mêmes prises/inclinaisons de la boîte et les mêmes dépôts furent utilisés que ceux décrits dans la première section sur les stratégies de flexion des genoux et de base d'appui. D'ailleurs deux des tâches déjà décrites dans cette section furent utilisées: la tâche genoux très fléchis et la tâche genoux peu fléchis, dans les deux cas avec la base d'appui large; la caractéristique principale de ces tâches consiste dans le fait que les pieds sont immobiles. Une troisième tâche fut comparée aux deux premières: cette tâche consistait en un pivot alternatif du pied gauche puis du pied droit, cette mobilité des pieds s'effectuant lorsque le poids du corps n'était pas supporté sur chacun des pieds, respectivement pour le pied gauche au départ et pour le pied droit avant le dépôt (Figure 5).

Stratégies combinées d'inclinaison de charge et de flexion des genoux. Dans cette expérience où les tâches s'effectuaient toutes dans un même plan, nous avons voulu regarder deux caractéristiques principales propres aux experts et novices, d'où trois tâches (Figure 6): l'une impliquant peu de flexion des genoux et une inclinaison de boîte vers l'arrière (vers le sujet), cette technique étant propre aux travailleurs experts; une autre impliquant une flexion prononcée des genoux et l'absence d'inclinaison de la boîte qui restait à plat, cette technique étant typique des novices; enfin, une troisième tâche caractérisée par une flexion prononcée des genoux et une inclinaison de la boîte vers l'arrière (vers le sujet). Les prises adoptées étaient symétriques et placées sous la boîte, au centre des arêtes droite et gauche (prises 8/8, Figure 3).

c) Techniques

Les données furent obtenues à l'aide de deux plates-formes de force (AMTD) permettant la mesure des trois composantes de force sous chaque pied ainsi que le point d'application de la force résultante et le couple de force autour de l'axe vertical. Un système de mesure du mouvement (Peak Performance) avec quatre caméras vidéos fonctionnant en synchronisation fut utilisé pour obtenir les coordonnées spatiales des 29 marqueurs anatomiques placés sur le sujet. Les données de force et celles des films étaient synchronisées électroniquement et étaient échantillonnées à 60 Hz. Un dynamomètre spécialement conçu pour mesurer les efforts maximaux représentés par des contractions isométriques volontaires autour des trois axes orthopédiques du tronc, permettait la mesure des moments maxima pour les extenseurs du dos, les rotateurs droits et les fléchisseurs latéraux droits. Ce dynamomètre incluait des capteurs dont les positions pouvaient être changées pour les différents axes d'efforts.

d) Méthodes

Un modèle dynamique segmentaire tridimensionnel incluait 14 segments: les pieds, les jambes, les cuisses, le pelvis, le tronc inférieur (L5/S1 à T12/L1) et le tronc supérieur (de T12/L1 à C7/T1), tête-cou, les bras, les avant-bras. Le centre de gravité total du système sujet/boîte était calculé. Les marqueurs étaient localisés spatialement à l'aide de la méthode de reconstruction dite Direct Linear Transformation ou DLT décrite par Marzan (1975). Les données furent lissées par un filtre de 4e ordre Butterworth à phase nulle. On supposait chaque segment comme rigide et un système de coordonnées local était défini sur chaque segment pour correspondre aux axes orthopédiques, longitudinal, sagittal et transverse. Une analyse dynamique inverse était effectuée sur chaque segment et les moments nets pouvaient être obtenus à chaque articulation. Dans le présent rapport, ce sont les moments au dos (L5/S1) et aux genoux qui seront prioritairement rapportés et analysés. Ce développement tridimensionnel a été décrit par Gagnon et Gagnon (1992).

L'orientation spatiale des segments a été décrite de deux façons, en utilisant l'approche développée par Grood and Suntay (1983) ou en utilisant la projection de vecteurs qu'on a appelé angles ergonomiques. L'approche de Grood et Suntay est plus rigoureuse mais plus complexe à interpréter; l'approche par projection de vecteurs se limite à un seul plan de projection. L'approche de Grood and Suntay telle qu'appliquée au tronc a été décrite par Plamondon et al. (1995). L'analyse par projection de vecteurs a permis le calcul d'angles ergonomiques d'intérêt pour caractériser l'asymétrie de posture. Ces angles ont été obtenus par la projection de quatre vecteurs dans le plan horizontal; ils caractérisent l'orientation de la prise, des épaules, du pelvis et de la base d'appui.

Les taux d'utilisation musculaire constituent un critère pour la mesure de la sévérité des efforts requis par les tâches. Ainsi des équations de régression ont été développées (Gravel et al, 1994; projet antérieur avec l'IRSST) qui prédisent les moments musculaires maximaux des extenseurs et des rotateurs droits du tronc en fonction des angles de flexion et de torsion du tronc. Ces moments musculaires maximaux prédits ont été utilisés pour estimer le taux d'utilisation musculaire (TUM) de chaque sujet dans les tâches analysées pour les extenseurs et les rotateurs du tronc. On a aussi supposé que l'orientation du tronc n'avait pas d'effet sur les efforts de flexion latérale du tronc et ainsi les TUM en inclinaison latérale furent calculés directement entre les valeurs obtenues dans les tâches et l'effort maximal mesuré par dynamomètre.

La stabilité du sujet dans la tâche a été évaluée à l'aide de nouveaux développements qui ont été effectués à cet effet dans un autre projet en cours avec l'IRSST (décrit dans le rapport d'étape, mars 1995). La stabilité est évaluée par le calcul de la force horizontale minimale qu'il faudrait appliquer au centre de gravité du système (sujets/boîte) pour déplacer le centre

de pression en dehors de la base d'appui. Cette estimation est basée sur l'hypothèse que, lorsque le centre de pression passe en dehors de la base d'appui, le système n'est plus en équilibre parce qu'il n'y a plus de support contre lequel la force de réaction peut s'appuyer. On a aussi posé l'hypothèse que la force de frottement statique sous les pieds est toujours suffisamment grande pour compenser toute force horizontale appliquée au système. La force horizontale minimale pour provoquer le déséquilibre a été appelée force déséquilibrante; donc plus elle est élevée, plus le sujet est stable. Cette procédure a été présentée dans Delisle et al. (texte soumis pour publication).

Le travail mécanique ou dépense d'énergie musculaire mécanique a été évalué pour l'analyse des tâches dans le plan sagittal. Le travail est calculé pour chaque articulation (en J et en %), et la distribution en travail positif et travail négatif pour représenter les efforts concentriques et excentriques est présentée; finalement, l'économie du mouvement, i.e. les niveaux de transfert d'énergie est évaluée. Cette approche a été appliquée à l'analyse des tâches de travail dans un projet antérieur avec l'IRSSST (Gagnon et Smyth, 1991).

e) Traitements statistiques

Des analyses de variance avec mesures répétées ont été appliquées pour évaluer les différences entre les stratégies et des comparaisons multiples ont permis de localiser ces différences. Pour les stratégies de flexion des genoux et de base d'appui, les effets principaux (flexion prononcée vs flexion faible et base large vs base étroite) ont été testés ainsi que les interactions. Pour les stratégies de prises manuelles et d'inclinaison des boîtes les comparaisons ont été effectuées entre les tâches impliquant les mêmes prises (à plat vs inclinaison arrière vs inclinaison à droite) et entre les tâches avec une inclinaison latérale (inclinaison à droite vs inclinaison à gauche). Pour les stratégies de mobilité des pieds, toutes les comparaisons ont été effectuées (genoux très fléchis vs genoux peu fléchis vs pivot alternatif). Similairement pour les stratégies combinées de prises manuelles et de flexion des genoux (genoux peu fléchis avec inclinaison de boîte vs genoux très fléchis avec inclinaison de boîte vs genoux très fléchis et sans inclinaison de boîte). Un niveau de probabilité de 0,05 a été utilisé.

RÉSULTATS

a) Stratégies de flexion des genoux et de base d'appui

La stratégie relative à la base d'appui n'eut que peu d'effet sur la posture du dos, la position des genoux et sur les efforts au dos et aux genoux; cependant l'équilibre fut moins stable avec une base d'appui étroite, tel qu'attendu (Tableaux 1-3). La différence entre les pieds pour les deux bases était de 16 cm. Donc, il ne semble pas que ce facteur base d'appui intervienne dans le processus du partage des efforts entre le dos et les genoux.

La stratégie relative à la flexion des genoux influença la stabilité et le partage des efforts entre le dos et les genoux à la prise et au dépôt: avec une stratégie des genoux peu fléchis, les sujets étaient moins stables (Tableau 1), les moments résultants aux genoux plus importants (Tableau 3) mais d'autre part les moments résultants au dos étaient moins importants et le couplage asymétrique des efforts au dos étaient aussi moins importants (Tableau 2). Les plus grands efforts aux genoux avec cette stratégie des genoux peu fléchis s'expliquent surtout par l'action des fléchisseurs alors que les extenseurs étaient, eux, moins élevés. De plus, on peut signaler que cette stratégie est associée à une moins grande mobilité (excursion) des genoux au cours de la manutention, surtout pour le genou gauche, ce qui pourrait minimiser les dépenses d'énergie mécanique musculaire.

Pour l'ensemble des stratégies, lorsqu'on compare les phases de la prise et du dépôt, on voit que c'est le dépôt qui est plus contraignant, avec une plus grande asymétrie de posture (surtout par la torsion combinée à la flexion du tronc); ceci vient du fait que les pieds sont placés plus près de l'étagère de prise que de celle du dépôt (orientation de 25°) (Tableau 1). Les sujets n'étaient pas assez expérimentés pour anticiper le dépôt et choisir une position plus intermédiaire entre la prise et le dépôt: c'est ce qui ressort.

b) Stratégies de prises manuelles et d'inclinaisons de boîte

Les stratégies de prises manuelles et d'inclinaisons de boîte ont affecté les efforts spécifiques au dos (en extension et en flexion latérale) et les orientations spécifiques du dos (en torsion et en flexion latérale), résultant au dépôt en un plus grand couplage d'efforts avec la technique d'inclinaison arrière et un certain niveau d'asymétrie de posture pour toutes les tâches (Tableau 4). Pour la stratégie d'inclinaison arrière, les moments résultants et les moments en extension du dos étaient plus faibles mais d'autre part, les moments de flexion latérale étaient plus grands de façon à ce que les taux d'utilisation musculaire étaient ainsi plus élevés, du double, pour les fléchisseurs latéraux. Une plus grande torsion du tronc vers la gauche fut obtenue avec la technique d'inclinaison à droite et donc une plus grande asymétrie fut observée car le tronc était fléchi semblablement ($\approx 40^\circ$) pour toutes les stratégies.

Pour les genoux, tous les efforts furent plus faibles avec la technique d'inclinaison à gauche quoique l'orientation des genoux était similaire pour toutes les tâches (Tableau 5). Au dépôt, les moments prédominants étaient les fléchisseurs (de 31 à 46 Nm), les fléchisseurs latéraux externes (de 35 à 52 Nm) et les rotateurs externes (de 35 à 52 Nm).

Les angles ergonomiques représentant l'orientation spatiale des segments ont révélé qu'au dépôt, c'était la technique d'inclinaison à gauche qui présentait les prises les plus symétriques par rapport au pelvis et aux épaules et c'était la technique d'inclinaison arrière qui présentait le plus de symétrie entre les épaules et le pelvis alors que la technique d'inclinaison à droite présentait le plus d'asymétrie à ce niveau (Tableau 6). Pour toutes les tâches, l'angle entre la base d'appui et le pelvis était similaire ($\approx 40^\circ$) et représentait 60% de l'asymétrie entre les épaules et la base d'appui. Enfin, la stabilité était moins bonne avec la technique d'inclinaison à gauche et se produisait au dépôt. Le plus grand risque de déséquilibre était vers la gauche et l'arrière, pour toutes les tâches.

c) Stratégies de mobilité des pieds

Pour la posture du tronc, on note à la prise, la quasi absence d'asymétrie et la similarité de comportement pour toutes les techniques; au dépôt, toutefois, il y a présence d'asymétrie dans la posture du tronc surtout à cause de l'angle de torsion (Tableau 7). On note toutefois un certain avantage pour la technique de déplacement de pieds où l'asymétrie est réduite, l'angle de torsion étant de -12° par rapport à -18° et -20° pour les autres techniques.

Pour les genoux droit et gauche il y a présence d'asymétrie à la fois à la prise et au dépôt (Tableau 8). C'est avec la technique de déplacement de pied que le couplage de l'angle de flexion avec des angles de torsion et d'inclinaison est le plus important; d'autre part, c'est avec la technique avec genoux peu fléchis que le couplage des angles et l'asymétrie est le moins important.

Pour les orientations des segments en torsion, la technique de déplacement de pieds est associée à une moins grande asymétrie entre les prises et le bassin et entre les prises et les épaules, à la fois au moment de la prise et au moment du dépôt (Tableau 9). De plus, cette technique est aussi associée, au moment du dépôt, à une moins grande asymétrie entre les épaules et les pieds, entre les épaules et le bassin et entre le bassin et les pieds, tous ces

segments étant plus parallèles entre eux que ne le sont les autres techniques. Ces différences sont substantielles.

Pour les efforts du tronc (Tableau 10), on note, à la prise comme au dépôt une asymétrie d'efforts; en effet, il y a une présence d'efforts autour des axes secondaires de torsion et d'inclinaison latérale couplée aux efforts en extension; cependant, les valeurs des taux d'utilisation musculaire (TUM) indiquent que ces efforts sont relativement peu élevés (inférieurs à 15% en torsion et à 10% en inclinaison), seuls les efforts en extension étant importants avec des TUM de l'ordre de 50%. Même si le couplage d'efforts ou asymétrie d'efforts reste faible, c'est avec la technique de déplacement de pieds qu'il est le plus important à cause de la présence simultanée d'efforts autour des trois axes. D'autre part, c'est avec la technique genoux peu fléchis que l'asymétrie d'efforts est la plus faible, les efforts en torsion et en inclinaison latérale restant très faibles.

Pour les efforts aux genoux, on note, à la prise comme au dépôt, moins d'efforts en flexion avec la technique genoux très fléchis et plus d'efforts en flexion avec la technique genoux peu fléchis, tel qu'attendu (Tableau 11). La technique de déplacement de pieds se distingue au dépôt, par la présence de plus grands efforts en inclinaison latérale.

d) Stratégies combinées de flexion des genoux et d'inclinaison (ou pivot) de charge (lever symétrique)

Les mouvements des experts/novices comportent deux éléments qu'on a tenté d'étudier distinctement: a) l'effet de pivot de la charge et b) l'action des jambes. Dans la tâche "experts" il y a peu de flexion des genoux mais présence d'un pivot de boîte alors que dans la tâche "novices" il y a une grande flexion des genoux et absence de pivot de la boîte. Une autre tâche avec flexion des genoux et pivot de la boîte a permis l'examen des facteurs flexion de genoux et pivot séparément.

Cinématique (Tableau 12)

Pour la technique d'experts (fléchis/avec pivot) on trouve un temps de mouvement plus long mais d'autre part, le temps du mouvement où la charge est entièrement supportée par le travailleur s'avère significativement plus court et cette longueur même du parcours est plus courte lorsqu'on compare avec la technique des novices. Or, cet effet n'est pas attribuable à l'action des jambes (tendus/pivot vs fléchis/pivot) mais à l'action même du pivot (fléchis/pivot vs fléchis/sans pivot). Les distances de la caisse par rapport au dos (L5/S1) sont aussi plus courtes pour la technique d'experts et plus longues pour la technique des novices, les effets combinés d'action de jambes et de pivot étant présents.

Tel qu'attendu la technique d'experts amène une moins grande flexion des genoux par rapport aux deux autres techniques à la prise mais non au dépôt; de plus on observe une moins grande excursion ou étendue du mouvement des genoux tout au long du mouvement avec cette technique. C'est lorsqu'on adopte la technique des novices qu'on note la plus grande flexion des genoux et la plus grande excursion de mouvement d'extension des genoux. L'angle du tronc à la prise est aussi très affecté: avec la technique d'experts le tronc est fléchi sous l'horizontale, alors qu'avec la technique des novices c'est là que la flexion est la moins prononcée tout en demeurant près de l'horizontale. L'excursion du tronc est donc aussi plus importante pour la technique d'experts. À l'articulation lombo-sacrée, l'excursion de mouvement est similaire pour toutes les stratégies. Ainsi, on peut dire que ces effets positionnels sont surtout le fait de l'action des genoux (pour environ 75%) et à non moindre degré le fait de l'action du pivot (25%).

Pour l'équilibre on note une certaine tendance à l'augmentation de la précarité de l'équilibre pour la technique d'experts à cause de l'élévation du centre de masse, lors de la prise (non significatif) mais cette précarité est beaucoup plus importante au dépôt et c'est alors similaire pour les trois techniques.

Cinétique: Moments musculaires et chargements lombaires maxima (Tableau 13)

Pour la technique d'experts, les chargements au dos (L5/S1) maxima et moyens sont moins élevés comme le laissaient présager ces moments musculaires des extenseurs plus faibles en L5/S1 ainsi que les distances plus courtes entre la charge et le dos (ci-haut). On peut dire que la plus grande part de ces effets vient de l'action des jambes; toutefois une certaine part vient de l'action du pivot (même si non significatif au plan statistique).

On peut alors se demander s'il y a un effet inverse pour les genoux. Même si les moments fléchisseurs sont similaires pour les trois techniques on voit que les moments extenseurs sont aussi beaucoup plus faibles pour la technique d'experts. Cet effet provient uniquement de l'effet d'action des jambes et non du pivot. Et pour les autres articulations? En fait, la technique d'experts mène aussi à de plus faibles moments fléchisseurs aux épaules et aux coudes. Là aussi c'est dû à l'action des jambes mais aussi à l'action du pivot dans le cas des efforts aux épaules.

Cinétique: travail mécanique (Tableau 14)

La technique d'experts amène une production de travail beaucoup moins importante. L'effet de l'action des jambes y est pour environ 75% et l'action du pivot pour 25% (NS dans ce cas). La réduction du travail est surtout le fait du dos et des membres inférieurs (chevilles et genoux) mais non des membres supérieurs. L'effet d'action des jambes prédomine nettement mais non celui du pivot.

DISCUSSION

a) Des stratégies de flexion des genoux

Dans la présente étude, on a supposé que différentes stratégies d'utilisation des membres inférieurs pouvaient influencer la distribution des efforts entre le dos et les genoux. De plus, on a supposé que ces stratégies pouvaient influencer l'équilibre du travailleur.

Les résultats ont confirmé que la stratégie de flexion des genoux influençait la distribution des efforts asymétriques au dos et aux genoux. Les résultats les plus importants sont à l'effet que la stratégie impliquant peu de flexion des genoux minimisait les efforts asymétriques au dos et réduisait l'asymétrie de position des genoux. Ainsi le couplage des efforts d'extension et de flexion latérale au tronc était plus faible et la rotation interne des genoux était aussi moins prononcée avec cette stratégie, un avantage certain pour cette technique.

Les résultats ont aussi démontré qu'il existait une relation inverse entre les efforts au tronc et aux genoux dans ce cas. Les moments résultants et d'extension au dos sont plus faibles alors que les moments résultants aux genoux et ceux en flexion sont plus élevés pour la stratégie impliquant les genoux peu fléchis. Ces résultats sont surprenants car dans les levers symétriques on a souvent recommandé l'utilisation d'une stratégie avec genoux fléchis (squat) pour transférer les chargements du dos vers les genoux. Cependant plusieurs études comparant la technique stoop à la technique squat ont démontré que les chargements au dos étaient soit similaires soit plus faibles au dos avec la technique "stoop" (Dolan et al., 1994; Garg et Herrin, 1979; Toussaint et al., 1992; van Dieen et al., 1994). Conséquemment, l'utilisation d'une stratégie de flexion de genoux pour réduire les chargements au dos est

questionnable. Récemment, Gagnon et al. (1995) ont observé chez des travailleurs experts comparativement à des novices, le choix de stratégies impliquant peu de flexion des genoux, peu de mobilité de flexion/extension des genoux mais des efforts plus importants pour les fléchisseurs des genoux; de plus les extenseurs des genoux étaient plus faibles alors que les efforts du dos étaient similaires. Dans la présente étude, le tronc était aussi fléchi pour les deux stratégies.

Gagnon et al. (1995) mentionnèrent que la stratégie avec peu de flexion des genoux pouvait être plus avantageuse que la stratégie avec les genoux très fléchis. Ils invoquèrent le fait qu'avec les genoux peu fléchis, les fléchisseurs des genoux (muscles bi-articulés) agissaient à la fois comme fléchisseurs des genoux et extenseurs des hanches et ainsi pouvaient aider à la stabilisation du bassin contre lequel les erectors spinae pouvaient agir pour produire l'extension du tronc. Cependant, cet effet est très dépendant de la flexion de la hanche.

Un élément important de discussion est le fait que le dépôt apparaît plus à risque que la prise. Au dépôt il y a production de larges efforts d'extension du tronc alors que le tronc est très fléchi et très en torsion ce qui peut constituer un facteur pour endommager l'anneau fibreux du disque intervertébral (Shirazi-Adl, 1989). A cela on peut ajouter que c'est au dépôt que la stabilité était la plus précaire. Il est très probable que le positionnement des pieds imposé aux sujets soit responsable de ce fait: en effet les pieds étaient plus orientés vers l'étagère de la prise que de celle du dépôt avec le résultat qu'il y avait moins d'asymétrie à la prise et plus au dépôt. Une façon d'optimiser ce placement aurait été de demander au sujet d'orienter ses pieds à mi-chemin entre les étagères. Ceci aurait probablement accru l'asymétrie à la prise mais l'aurait réduite au dépôt. De plus, une meilleure stabilité au dépôt se serait probablement ensuivie. Une autre façon d'optimiser les placements de pieds serait de permettre la mobilité des pieds. Il est possible que la torsion au dépôt ait été accrue par l'imposition des pieds fixes en contact avec les plates-formes de force. Le pivotement des pieds, entre autres, pourrait être une alternative de mobilité des pieds qui pourrait avoir un impact sur les efforts et la stabilité (voir étude suivante: point C).

En conclusion, les stratégies de flexion de genou ont influencé le partage ou la distribution des efforts entre le dos et les genoux: avec une stratégie de genoux peu fléchis, les efforts au dos étaient légèrement plus faibles alors que les efforts aux genoux étaient plus importants. De plus, cette stratégie a permis de réduire les efforts asymétriques au dos et l'asymétrie des genoux; la réduction de mobilité suggère une moins grande dépense musculaire d'énergie mécanique; cependant, la stabilité est moins bonne. En ce qui concerne les stratégies de largeur de base d'appui elle n'avait que peu d'effet pour les efforts au dos et aux genoux quoique la stabilité était plus grande avec une stratégie de base large. Les résultats suggèrent donc que les travailleurs qui utilisent la stratégie avec peu de flexion des genoux dans le lever pourraient le faire pour transférer les efforts du dos aux genoux (axe transverse), pour réduire les efforts asymétriques au dos et les positions asymétriques des genoux, pour réduire les dépenses énergétiques mais dans un tel contexte la stabilité se trouverait compromise. Les résultats suggèrent que la mobilité des pieds s'avère un facteur important qui mérite une analyse approfondie.

b) Des stratégies de prises manuelles et d'inclinaisons de boîte

Les résultats de l'étude ont démontré que ces stratégies de prises manuelles et d'inclinaisons de boîte avaient une influence certaine sur les moments musculaires exercés au dépôt, surtout au dos. Cependant, aucune de ces stratégies ne s'est imposée avec évidence, comme optimale pour minimiser les efforts asymétriques au dos. On attribue aux prises asymétriques une plus grande stabilité verticale et horizontale de la boîte (Coury et Drury, 1982) et ces prises combinées à des inclinaisons de la boîte sont perçues comme une

alternative à une meilleure distribution du poids de la boîte symétriquement sur les deux mains et à une réduction des efforts asymétriques au dos (Authier et al., 1995a). Cependant, les inclinaisons de boîte telles qu'effectuées dans la présente étude ont résulté en des efforts asymétriques qui peuvent s'expliquer. La technique d'inclinaison à droite en transférant tout le poids sur la main droite résultait en la réaction d'un moment opposé des fléchisseurs latéraux gauches. La technique d'inclinaison arrière transférait une grande partie du poids sur la main gauche ce qui résultait en la réaction d'un moment opposé par les fléchisseurs latéraux droits. Par contre, cette technique permettait de déplacer le centre de gravité de la boîte plus près de l'articulation lombo-sacrée (L5/S1) d'où une diminution des efforts du dos en extension. La technique d'inclinaison à gauche déplaçait la plus grande partie du poids de la boîte sur la main gauche, d'où une réaction équilibratrice des fléchisseurs latéraux droits. C'était aussi le cas pour la technique à plat. Par conséquent, cette technique à plat, associée aux travailleurs novices, n'était ni meilleure ni pire que les autres techniques associées aux experts.

Un fait important qui limita probablement la portée de l'étude est que toutes ces inclinaisons de boîte s'effectuaient dans une direction unique (gauche, droite, arrière). La combinaison de plusieurs inclinaisons pourraient présenter des avantages. Par exemple, une inclinaison latérale combinée à une inclinaison arrière de la boîte pourraient résulter en une meilleure distribution du poids de la boîte sur les deux mains et en un meilleur équilibre des efforts de flexion latérale. En fait, Authier et al. (1995a) observèrent que les experts déposaient plus fréquemment les boîtes sur un coin par rapport aux novices ce qui suggère une combinaison d'inclinaisons de boîte dans plusieurs directions. Cet aspect semble une avenue intéressante pour réduire les efforts asymétriques, une avenue à explorer. La présente étude a donc mis en évidence la complexité des relations entre les prises manuelles et les inclinaisons des contenants.

Il est aussi intéressant de noter que ces stratégies de prises manuelles et d'inclinaisons de boîte ont affecté la stabilité des sujets. Ainsi, la technique d'inclinaison à gauche était significativement moins stable probablement parce qu'avec cette technique le centre de gravité global était déplacé plus près de la limite gauche de la base d'appui. L'impact des prises sur la stabilité est donc aussi important que l'était l'impact de base d'appui et de flexion du genou (section précédente).

Dans cette étude, la position des pieds était imposée et demeurait fixe tout au cours du mouvement et seulement deux types de prises manuelles furent utilisées pour étudier l'effet de quatre types d'inclinaison de boîte. Cependant, dans les tâches de manutention libre jusqu'à 40 prises différentes sont observées chez les travailleurs experts, et le type d'inclinaison de boîte ainsi que la position des pieds furent parmi les paramètres de manutention rapportés avoir été influencés par la hauteur de saisie de la boîte et/ou le poids de la boîte (Authier et al., 1995b) ce qui confirme la grande diversité de stratégies de manutention et leur complexité. Le choix d'une stratégie de manutention dépend donc du contexte et il existe plusieurs possibilités de combinaison de prises, d'inclinaisons de boîtes et de positions de pieds qui peuvent représenter des stratégies de manutention sécuritaires ou risquées. Il s'agit d'une première étude qui révèle l'effet d'inclinaison des boîtes sur les chargements articulaires au dos et aux genoux, sur la posture et sur la stabilité des manutentionnaires. Un aspect important qui n'a que très peu été étudié et qui pourrait s'avérer déterminant c'est la stratégie de déplacement des pieds. Bien que ces paramètres de manutention aient été étudiés séparément ils sont probablement interdépendants. Cependant, on a pu, en les examinant séparément, déterminer le potentiel de chacun de ces paramètres sur les efforts musculaires aux articulations et sur la stabilité. L'étude des interactions de ces paramètres nécessitera l'analyse de stratégies très proches des situations réelles de manutention.

En conclusion, les dépôts effectués sur les arêtes des boîtes et résultant de différents types d'inclinaison n'ont pas amené une réduction de l'asymétrie des efforts lorsque comparés avec un dépôt avec la boîte à plat associé aux novices. Cependant, les inclinaisons furent exécutées dans une seule direction à la fois et il est possible que des inclinaisons combinées de la boîte puissent produire une réduction des efforts asymétriques au dos. Ces stratégies n'ont eu que peu d'effet sur les chargements aux genoux quoique l'une de ces stratégies ait résulté en de plus faibles moments résultants au genou gauche, au dépôt. Similairement pour la stabilité, l'une de ces stratégies, par l'inclinaison de la boîte dans la direction du mouvement (inclinaison à gauche ici) résultait en une moins bonne stabilité par le fait que cette stratégie déplaçait le centre de gravité vers la gauche, la direction la plus risquée pour une perte d'équilibre dans la présente situation. Cette étude a démontré l'importance de considérer les prises manuelles et les inclinaisons de boîte dans l'évaluation des risques associés à la manutention asymétrique.

c) Des stratégies de mobilité des pieds

Les résultats de l'étude ont mis en évidence le fait que la mobilité des pieds avait une influence sur la posture du travailleur, sur les efforts et sur la stabilité. Cependant, on ne peut conclure que cette méthode particulière de déplacement par pivots alternatifs sur chaque pied ait été optimale puisqu'elle est liée à plus d'asymétrie d'efforts au dos (quoique l'asymétrie de posture soit quant à elle réduite), à moins de stabilité et à des efforts latéraux aux genoux plus importants. Dans le présent contexte, la technique impliquant une flexion peu prononcée des genoux avec les pieds fixes semble offrir un meilleur potentiel en ce sens que les efforts asymétriques au tronc sont réduits même si l'asymétrie de posture est un peu plus élevée pour le tronc. Le seul avantage réel de la technique impliquant une flexion prononcée des genoux c'est la plus grande stabilité.

Il convient donc ici de mettre emphase sur le fait que la mobilité des pieds est un facteur influençant qu'il faut prendre en considération mais les modes de déplacement (ou de positions fixes) des pieds doivent faire l'objet de recherches plus approfondies. Il est aussi clair que le type de prises ou d'inclinaison de boîte produira des interactions avec le mode de déplacement de pieds. Il est aussi attendu que le type de tâche (levée, abaissement), la hauteur, le type de contenant sont tous des facteurs qui pourraient produire des effets différents pour ces paramètres. Le problème en est un complexe et il est clair qu'il n'existe pas de solution unique aux problèmes de manutention.

d) Des stratégies combinées d'inclinaison (ou pivot) de charge et de flexion des genoux

Ce projet a été réalisé pour examiner deux aspects relatifs à la stratégie des travailleurs experts comparativement à celle des novices: la réduction de l'action des genoux et l'utilisation du pivot de la charge pour avancer et élever le centre de gravité de la charge à la prise et au dépôt. Les résultats ont clairement mis en évidence l'importance de ces deux facteurs pour minimiser les facteurs de risque associés à la manutention.

Il semble que la minimisation d'action des genoux a un impact important pour minimiser les chargements au dos, réduire l'action des extenseurs des genoux responsable des contraintes associées au syndrome fémoro-rotulien et même réduire les efforts des membres supérieurs. La charge se trouve substantiellement rapprochée de l'articulation lombo-sacrée avec la technique d'experts. Les effets sont particulièrement visibles à la prise mais aussi au dépôt pour le dos. La posture avec cette technique en est une où le tronc est lui-même extrêmement fléchi à la prise mais par contre, l'articulation lombo-sacrée impliquant l'angle entre le bassin et le tronc n'est que très peu influencée par le type de technique. Il y a donc une optimisation au niveau des efforts associée à la minimisation de la flexion des genoux:

en fait l'excursion est relativement faible pour les genoux (40°) et l'articulation lombo-sacrée (37°) avec cette technique d'experts. La réduction d'action des genoux se répercute sur l'optimisation du travail en ce sens que la tâche est substantiellement moins exigeante par environ 15%, ce qui peut être un facteur important lors de mouvements répétitifs. Chose intéressante, les facteurs d'équilibre ne sont pas compromis avec cette technique. Il y a donc une différence à ce niveau entre les résultats présentés pour la flexion des genoux dans un lever asymétrique (section a) et les résultats présents pour un lever symétrique.

L'action du pivot a un effet très important sur l'optimisation de la trajectoire, en ce sens que l'utilisation du pivot (vers soi) réduit de façon substantielle la longueur et la durée (environ 15%) de la phase critique du lever, celle où la charge est entièrement supportée par le travailleur. Par contre, le type de manoeuvre augmente le temps complet de la réalisation de la tâche par près de 50% sur l'ensemble des opérations, il y aura donc une augmentation du temps de travail. Cela est cependant très économique car le rapprochement conséquent de la charge par rapport au dos se traduit par une réduction de la force de compression moyenne et maximale au dos et se traduit aussi par une réduction des efforts musculaires aux épaules. Il y a aussi, avec le pivot, une certaine tendance à la réduction du travail mécanique (bien qu'elle soit statistiquement non significative).

CONCLUSIONS

- La stratégie de peu de flexion des genoux typique des experts lorsque comparée à la stratégie de flexion prononcée des genoux typique des novices est associée à une réduction des efforts au dos, à une réduction de l'asymétrie d'efforts aux dépens d'une augmentation des efforts aux genoux, des fléchisseurs, qui ont une action potentielle de stabilisation du bassin et aux dépens d'une moins grande stabilité. De plus, la réduction de mobilité des genoux est indicatrice d'une moins grande dépense d'énergie. D'autre part, la largeur de base n'a que peu d'influence sur la posture et le partage des efforts: seule la stabilité plus grande avec la base plus large favorise cette technique.
- Aucune des stratégies de prises manuelles ne s'est avérée la meilleure pour l'ensemble des facteurs. Certaines prises ont été associées à plus d'asymétrie de posture du tronc ou d'efforts, d'autres à des réductions d'efforts aux genoux, et enfin d'autres à une moins grande stabilité. Il semble donc important d'étudier de façon plus approfondie le couplage des prises manuelles avec les inclinaisons des boîtes. Les études ergonomiques ont mis en évidence que des prises types impliquent des inclinaisons de boîte autour de plusieurs axes. L'étude des stratégies de prises couplée à une inclinaison simple ne semble pas déboucher sur des solutions potentielles.
- La stratégie de mobilité des pieds comparativement à des stratégies où les pieds étaient fixés ne s'est avérée ni meilleure ni pire pour l'ensemble des facteurs. Les résultats suggèrent toutefois que la stratégie où les pieds sont fixés et que les genoux sont peu fléchis présente le meilleur potentiel et c'est lié au point premier de la discussion qui portait sur la flexion des genoux. Le contexte ne se prêtait possiblement pas à l'adoption d'une stratégie de mobilité de pieds; ce type de mobilité, à cause du poids alterné sur l'un puis l'autre pied présente des problèmes de stabilité. D'autres stratégies de mobilité, tel le choix de pas méritent une étude plus approfondie.
- La stratégie impliquant (dans un lever symétrique) peu de flexion de genoux couplée à un pivot de la boîte vers le travailleur et typique des experts lorsque comparée à la stratégie impliquant une grande flexion des genoux avec absence d'inclinaison de boîte, typique des novices, confirme que ce double critère (genoux/pivot) est très important. Cette stratégie optimise le parcours (en le minimisant), minimise la dépense d'énergie, minimise les efforts au dos ainsi que les efforts aux autres articulations tels les genoux, les épaules

et les coudes. Seule la stabilité est moins grande avec cette stratégie mais à un moment du mouvement où c'est peu critique.

RETOMBÉES ESCOMPTÉES

La confrontation des modes opératoires sélectionnés par des travailleurs experts à ceux de novices est une approche tout à fait originale et une avenue qui devrait permettre de comprendre quels sont les facteurs qui sont optimisés par une longue expérience de travail. Cette compréhension devrait aussi nous amener à mieux comprendre les processus mis en cause pour réduire les risques de blessures et optimiser les manutentions sécuritaires. Nous nous basons sur la prémisse que des travailleurs experts (peu blessés, longue expérience) possèdent des stratégies qui contiennent des éléments de solution quant à la manutention sécuritaire. Une retombée consiste aussi à alimenter en informations pertinentes les responsables en ergonomie du programme de formation des travailleurs manutentionnaires. Il y a pourtant lieu d'insister sur le fait que cette problématique est extrêmement complexe et multifactorielle et que les solutions sont très dépendantes des contextes de travail.

BIBLIOGRAPHIE

- Authier, M., Lortie, M. and Gagnon, M. (1995a). Manual handling techniques: comparing novices and experts. *International Journal of Industrial Ergonomics* (sous presse).
- Authier, M., Lortie, M. and Gagnon, M. (1995b). Handling techniques: the influence of weight and height for experts and novices. *Journal of Occupational Safety and Ergonomics* (accepté).
- Coury, B.G. and Drury, C.G. (1982). Optimum handle positions in a holding task as a function of task height. *Ergonomics* 25, 645-662.
- Delisle, D., Gagnon, M. and Desjardins, P. Lower limbs' strategies in asymmetrical handling: stability conditions and the sharing of efforts between trunk and knees (soumis).
- Dieën van, J.H., Creemers, M., Draisma, I., Toussaint, H.M. and Kingma, I. (1994). Repetitive lifting and spinal shrinkage, effects of age and lifting technique. *Clinical Biomechanics* 9, 367-374.
- Dolan, P., Mannion, A.F. and Adams, M.A. (1994). Passive tissues help the back muscles to generate extensor moments during lifting. *J. Biomechanics* 27, 1077-1085.
- Drury, C.G., Law, C.-H. and Pawenski, C.S. (1982). A survey of industrial box handling. *Human Factors* 24, 553-565.
- Gagnon, D. and Gagnon, M. (1992). The influence of dynamic factors on triaxial net muscular moments at the L5/S1 joint during asymmetrical lifting and lowering. *J. Biomechanics* 25, 891-901.
- Gagnon, M., Plamondon, A., Gravel, D. and Lortie, M. (1995). Expert workers use their knees more efficiently than novice workers. *Congrès PREMUS, aura lieu en septembre 1995, à Montréal.*
- Gagnon, M. and Smyth, (1991). Muscular mechanical energy expenditure as a process for detecting potential risks in manual materials handling. *J. Biomechanics* 24, 191-203.
- Garg, A. and Herrin, G.D. (1979). Stoop or squat: a biomechanical and metabolic evaluation. *AIIE Transactions* 11, 293-302.
- Gravel, D., Gagnon, M., Plamondon, A. and Desjardins, P. (1994). Development of predictive equations of maximal static moments generated by the extensor and axial rotator muscles of the trunk. *Proceedings of the Eight Biennial Conference of the Canadian Society for Biomechanics, Calgary, pp. 200-201.*
- Grood, E.S. and Suntay, W.J. (1983). A joint coordinate system for the clinical description of three-dimensional motions: Application to the knee. *J. Biomech. Eng.* 105, 136-144.
- Plamondon, A., Gagnon, M. and Gravel, D. (1995). Moments at the L5/S1 joint during asymmetrical lifting: effects of different load trajectories and initial load positions. *Clinical Biomechanics* 10, 128-136.
- Shirazi-Adl, A. (1989). Strain in fibres of a lumbar disc. Analysis of the role of lifting in producing disc prolapse. *Spine* 14, 96-103.

Toussaint, H.M., van Baar, C.E., van Langen, P.P., de Looze, M.P. and van Dieën, J.H. (1992). Coordination of the leg muscles in backlift and leglift. *J. Biomechanics* 25, 1279-1289.

Tab 1. Moyennes et écart types des variables cinématiques et la stabilité pour des stratégies de base d'appui et de flexion de genoux (N = 14).

Variables	Base (B)		Genoux (G)		Probabilité		
	Large	Étroite	Très fléchis	Peu fléchis	B	G	B x G
• Espacement max. entre les pieds (m)	.57 (.01)	.41 (.01)	.49 (.01)	.49 (.01)	.00	.01	NS
• Orientation de la base d'appui (°) ^a	21 (3)	28 (2)	25 (2)	24 (2)	.00	NS	NS
Caractéristiques de stabilité							
• Force déséquilibrante min. (N) ^c	67 (15)	61 (14)	68 (16)	59 (11)	NS	.01	NS
• Force déséquilibrante moyenne (N)	117 (14)	108 (13)	118 (14)	107 (12)	.04	.00	NS
Posture du dos							
Prises							
• Flexion (°) ^b	-43 (10)	-44 (9)	-44 (9)	-43 (10)	NS	NS	NS
• Torsion (°) ^b	5 (9)	5 (9)	2 (9)	8 (9)	NS	.00	NS
• Inclinaison latérale (°) ^b	0 (6)	-1 (7)	-3 (7)	3 (7)	NS	.00	NS
Dépôt							
• Flexion (°) ^b	-40 (7)	-41 (8)	-41 (8)	-40 (7)	NS	NS	NS
• Torsion (°) ^b	-19 (7)	-17 (7)	-17 (7)	-19 (7)	.02	NS	NS
• Inclinaison latérale (°) ^b	3 (5)	1 (6)	0 (6)	4 (6)	NS	.03	NS
Position des genoux							
• Flexion max. genou droit (°)	48 (11)	55 (11)	71 (16)	33 (9)	.00	.00	.00
• Excursion genou droit (°)	16 (5)	19 (5)	20 (4)	15 (6)	NS	.03	.03
• Flexion max. genou gauche (°)	46 (9)	53 (11)	69 (13)	30 (8)	.01	.00	NS
• Excursion genou gauche (°)	17 (5)	19 (6)	25 (6)	11 (4)	NS	.00	NS

^a 0° = Parallèle à la position initiale de la boîte; 90° = parallèle à la position finale de la boîte

^b Orientation du tronc par rapport au pelvis; debout droit = 0°. Les signes négatifs signifient flexion, torsion à gauche, et inclinaison à droite.

^c Occurrence au dépôt

Tableau 2. Moyennes et écarts types des efforts au dos pour des stratégies de base d'appui et de flexion des genoux (N = 14).

Variables	Base (B)		Genoux (G)		Probabilité		
	Large	Étroite	Très fléchis	Peu fléchis	B	G	B x G
Prises							
Moment résultant (Nm)	207 (23)	206 (18)	214 (21)	200 (18)	NS	.00	NS
Moment d'extension (Nm)	203 (23)	202 (18)	209 (21)	196 (18)	NS	.00	NS
Moment d'inclinaison latérale (Nm) ^a	-10 (32)	-7 (31)	-21 (34)	4 (31)	NS	.00	NS
TUM en extension (%)	49 (12)	49 (12)	50 (13)	48 (11)	NS	.00	NS
TUM en flexion latérale (%)	5 (16)	4 (14)	10 (16)	0 (14)	NS	.00	NS
Dépôt							
Moment résultant (Nm)	198 (19)	200 (15)	205 (20)	193 (15)	NS	.01	NS
Moment d'extension (Nm)	196 (18)	197 (14)	202 (19)	191 (14)	NS	.02	NS
Moment d'inclinaison latérale (Nm) ^a	-15 (17)	-23 (20)	-26 (19)	-12 (17)	NS	.01	NS
TUM en extension (%)	51 (13)	50 (12)	51 (12)	51 (13)	NS	NS	NS
TUM en flexion latérale (%)	6 (6)	10 (9)	10 (6)	5 (8)	NS	.03	NS

^a Signe négatif: moment de flexion latérale à gauche

Tableau 3. Moyennes et écarts types des efforts aux genoux pour des stratégies de base d'appui et de flexion des genoux (N = 14)

Variables	Base (B)		Genoux (G)		Probabilité		
	Large	Étroite	Très fléchis	Peu fléchis	B	G	B x G
Prises (genou droit)							
Moment résultant (Nm)	77 (12)	74 (12)	57 (17)	95 (12)	NS	0.00	NS
Moment de flexion (Nm)	54 (19)	55 (13)	24 (26)	85 (16)	NS	0.00	0.03
Moment de torsion externe (Nm)	18 (4)	20 (5)	20 (6)	18 (4)	NS	NS	NS
Moment de flexion latérale externe (Nm)	38 (9)	33 (13)	39 (15)	31 (14)	NS	NS	NS
Dépôt (genou gauche)							
Moment résultant (Nm)	83 (18)	82 (10)	68 (10)	96 (17)	NS	0.00	NS
Moment de flexion (Nm)	63 (24)	62 (17)	43 (21)	82 (20)	NS	0.00	NS
Moment de torsion externe (Nm)	22 (6)	21 (5)	23 (5)	20 (6)	NS	NS	NS
Moment de flexion latérale externe (Nm)	37 (23)	41 (17)	40 (17)	37 (23)	NS	NS	NS

Tableau 4. Moyennes et écarts types pour les caractéristiques du tronc, lors du dépôt, en fonction des stratégies de prises manuelles et d'inclinaisons de boîte (N = 14).

Variables	Type d'inclinaison de boîte				Probabilité			
	Gauche (G)	À plat (P)	Arrière (A)	Droite (D)	GvsD	PvsA	PvsD	AvsD
Efforts								
Moment résultant (Nm)	207 (21)	208 (20)	192 (24)	206 (25)	NS	.00	NS	.00
Moment d'extension (Nm)	203 (21)	203 (23)	184 (23)	203 (25)	NS	.00	NS	.00
TUM en extension (%)	52 (12)	50 (13)	45 (12)	52 (14)	NS	.00	NS	.00
Moment d'inclinaison latérale (Nm) ^a	28 (27)	33 (24)	51 (14)	-22 (19)	.00	.02	.00	.00
TUM en inclinaison latérale (%)	12 (13)	14 (11)	24 (11)	8 (8)	.00	.01	.00	.00
Orientation								
Angle de flexion (°) ^b	-39 (8)	-42 (8)	-40 (8)	-40 (7)	NS	NS	NS	NS
Angle de torsion (°) ^b	-13 (6)	-9 (7)	-4 (8)	-18 (6)	.01	.00	.00	.00
Angle d'inclinaison latérale (°) ^b	6 (7)	8 (6)	9 (4)	0 (6)	.00	NS	.00	.00

^a Le signe négatif signifie un effort du côté gauche

^b Orientation du tronc par rapport au pelvis. Le signe négatif signifie une flexion, une torsion à gauche, une inclinaison à droite.

Tableau 5. Moyennes et écarts types pour les caractéristiques des genoux lors du dépôt, en fonction des stratégies de prises manuelles et d'inclinaisons de boîte (N = 14).

Variables	Type d'inclinaison de boîte				Probabilité			
	Gauche (G)	À plat (P)	Arrière (A)	Droite (D)	GvsD	PvsA	PvsD	AvsD
<u>Efforts (genou gauche)</u>								
Moment résultant (Nm)	55 (15)	66 (15)	71 (18)	72 (13)	.00	NS	NS	NS
Moment en flexion (Nm)	31 (18)	44 (18)	38 (19)	46 (24)	.01	NS	NS	NS
Moment en torsion externe (Nm)	22 (5)	26 (6)	26 (5)	27 (5)	.00	NS	NS	NS
Moment en inclinaison externe (Nm)	35 (19)	44 (17)	52 (19)	46 (17)	.01	.03	NS	NS
<u>Orientation (genou gauche)</u>								
Angle de flexion (°) ^a	49 (14)	53 (14)	48 (16)	49 (14)	NS	NS	NS	NS
Angle de torsion (°) ^a	-19 (13)	-26 (13)	-22 (13)	-20 (11)	NS	NS	.05	NS
Angle d'inclinaison latérale (°) ^a	-4 (8)	-7 (10)	-8 (8)	-8 (6)	.02	NS	NS	NS

a Orientation du genou selon l'approche de Grood and Suntay; un signe négatif signifie l'extension (0° est la pleine extension), une torsion interne et une inclinaison externe du tibia.

Tableau 6. Moyennes et écarts types pour les variables ergonomiques et d'équilibre en fonction des stratégies de prises manuelles et d'inclinaisons de boîte (N = 14).

Variables	Type d'inclinaison de boîte				Probabilité			
	Gauche (G)	À plat (P)	Arrière (A)	Droite (D)	GvsD	PvsA	PvsD	AvsD
Angles ergonomiques: (au dépôt)								
Épaules p/r base (°)	66 (7)	66 (6)	57 (4)	70 (6)	.00	.00	.00	.00
Pelvis p/r (base (°)	41 (5)	41 (6)	40 (4)	40 (6)	NS	NS	NS	NS
Épaules p/r pelvis (°)	24 (7)	26 (6)	16 (4)	30 (6)	.00	.00	.00	.00
Prises p/r pelvis (°)	28 (6)	48 (8)	33 (4)	49 (6)	.00	.00	NS	.00
Prises p/r épaules (°)	3 (7)	23 (8)	17 (5)	19 (7)	.00	.00	.01	NS
Équilibre								
Force minimale déséquilibrante au dépôt (N)	55 (19)	68 (19)	64 (23)	71 (15)	.02	NS	NS	NS

Tableau 7. Moyennes et écarts types pour l'orientation du tronc à la prise et au dépôt en fonction de stratégies de mobilité des pieds (N = 14)

Variables	Pieds fixes		Pieds mobiles (3)	Probabilité		
	Genoux très fléchis (1)	Genoux peu fléchis (2)		1 vs 2	1 vs 3	2 vs 3
À la prise						
Angle de flexion (°) ^a	44 (11)	42 (10)	43 (9)	NS	NS	NS
Angle de torsion (°) ^a	3 (10)	8 (9)	4 (7)	.01	NS	NS
Angle d'inclinaison latérale (°) ^a	-2 (7)	3 (7)	-1 (8)	.00	NS	NS
Au dépôt						
Angle de flexion (°) ^a	41 (8)	39 (6)	41 (8)	NS	NS	NS
Angle de torsion (°) ^a	-18 (7)	-20 (8)	-12 (9)	NS	.00	.00
Angle d'inclinaison latérale (°) ^a	1 (6)	5 (6)	-4 (6)	.03	.01	.00

^a Angle du tronc relatif au pelvis. Un angle négatif signifie une flexion, une torsion à gauche et une inclinaison à droite.

Tableau 8. Moyennes et écarts types pour l'orientation des genoux à la prise et au dépôt en fonction de stratégies de mobilité des pieds (N = 14).

Variables	Pieds fixes		Pieds mobiles (3)	Probabilité		
	Genoux très fléchis (1)	Genoux peu fléchis (2)		1 vs 2	1 vs 3	2 vs 3
<u>À la prise (genou droit)</u>						
Angle de flexion (°) ^a	65 (15)	22 (9)	53 (17)	.00	.00	.00
Angle de torsion (°) ^a	-22 (16)	-2 (9)	-20 (10)	.00	NS	.00
Angle d'inclinaison latérale (°) ^a	-9 (11)	-10 (6)	-18 (10)	NS	.00	.00
<u>Au dépôt (genou gauche)</u>						
Angle de flexion (°) ^a	49 (14)	23 (10)	42 (14)	.00	.00	.00
Angle de torsion (°) ^a	-20 (11)	-5 (11)	-15 (15)	.00	NS	.03
Angle d'inclinaison latérale (°) ^a	-8 (6)	-9 (6)	-12 (7)	NS	.01	.02

^a Orientation du genou selon l'approche de Grood et Suntay; le signe négatif signifie qu'il y a extension (0° est la pleine extension), une torsion interne et une inclinaison externe du tibia.

Tableau 9. Moyennes et écarts types pour les angles ergonomiques à la prise et au dépôt et pour les variables d'équilibre en fonction des stratégies de mobilité des pieds (N = 14).

Variables	Pieds fixes		Pieds mobiles (3)	Probabilité		
	Genoux très fléchis (1)	Genoux peu fléchis (2)		1 vs 2	1 vs 3	2 vs 3
<u>À la prise</u>						
Prises p/r pelvis (°)	26 (7)	30 (9)	18 (9)	.03	.00	.00
Prises p/r épaules (°)	28 (9)	28 (11)	17 (10)	NS	.00	.00
Épaules p/r base (°)	-12 (8)	-10 (10)	-8 (17)	NS	NS	NS
Épaules p/r pelvis (°)	-2 (6)	2 (8)	1 (10)	NS	NS	NS
Pelvis p/r base	-11 (6)	-12 (6)	-9 (12)	NS	NS	NS
<u>Au dépôt</u>						
Prises p/r pelvis (°)	49 (6)	54 (6)	31 (7)	.00	.00	.00
Prises p/r épaules (°)	19 (7)	22 (6)	14 (8)	NS	.03	.00
Épaules p/r base (°)	70 (6)	67 (5)	22 (10)	NS	.00	.00
Épaules p/r pelvis (°)	30 (6)	32 (5)	18 (4)	NS	.00	.00
Pelvis p/r base (°)	40 (6)	35 (5)	4 (9)	.00	.00	.00
<u>Équilibre</u>						
Force minimale déséquilibrante au dépôt (N)	71 (15)	62 (17)	52 (7)	.02	.00	.03

T₂ au 10. Moyennes et écarts types pour les efforts du tronc à la prise et au dépôt en fonction des stratégies de mobilité des pieds (N = 14)

Variables	Pieds fixes		Pieds mobiles (3)	Probabilité		
	Genoux très fléchis (1)	Genoux peu fléchis (2)		1 vs 2	1 vs 3	2 vs 3
À la prise						
Moment résultant (Nm)	215 (27)	200 (21)	207 (18)	.00	.04	NS
Moment en extension (Nm)	211 (27)	196 (20)	203 (19)	.00	.04	NS
Moment en torsion (Nm) ^a	-5 (14)	-8 (14)	-20 (14)	NS	.00	.00
Moment en inclinaison latérale (Nm) ^a	-20 (36)	1 (35)	-19 (23)	.02	NS	.04
TUM en extension (%)	51 (14)	48 (11)	49 (12)	NS	NS	NS
TUM en torsion (%)	4 (8)	7 (9)	15 (11)	.05	.00	.01
TUM en inclinaison latérale (%)	9 (18)	1 (16)	9 (11)	.03	NS	.05
Au dépôt						
Moment résultant (Nm)	207 (26)	190 (16)	198 (17)	.01	NS	.02
Moment en extension (Nm)	204 (26)	188 (15)	195 (17)	.01	NS	.05
Moment en torsion (Nm) ^a	-8 (15)	-9 (13)	-20 (10)	NS	.02	.00
Moment en inclinaison latérale (Nm) ^a	-22 (15)	-8 (20)	-16 (18)	NS	NS	NS
TUM en extension (%)	53 (14)	49 (13)	49 (9)	NS	NS	NS
TUM en torsion (%)	4 (9)	4 (9)	12 (7)	NS	.01	.00
TUM en inclinaison latérale (%)	9 (9)	3 (8)	8 (7)	NS	NS	NS

^a Le signe négatif signifie un effort de torsion à droite et d'inclinaison à gauche

Tableau 11. Moyennes et écarts types pour les efforts aux genoux à la prise et au dépôt en fonction des stratégies de mobilité des pieds (N = 14).

Variables	Pieds fixes		Pieds mobiles (3)	Probabilité		
	Genoux très fléchis (1)	Genoux peu fléchis (2)		1 vs 2	1 vs 3	2 vs 3
<u>À la prise (genou droit)</u>						
Moment résultant (Nm)	60 (20)	98 (14)	72 (19)	.00	NS	.00
Moment en flexion (Nm)	20 (33)	89 (18)	40 (26)	.00	.01	.00
Moment en torsion externe (Nm)	20 (6)	16 (5)	23 (7)	NS	NS	.03
Moment en inclinaison externe (Nm)	43 (18)	32 (15)	47 (23)	NS	NS	NS
<u>Au dépôt (genou gauche)</u>						
Moment résultant (Nm)	68 (16)	98 (23)	105 (17)	.00	.00	NS
Moment en flexion (Nm)	42 (24)	84 (27)	56 (35)	.00	.05	.01
Moment en torsion externe (Nm)	24 (7)	20 (8)	28 (7)	.03	NS	.01
Moment en inclinaison externe (Nm)	39 (19)	35 (30)	76 (16)	NS	.00	.00

Tableau 12. Moyennes et écarts types pour les variables cinématiques relatives aux stratégies de flexion des genoux et de pivot de la charge (N = 7)

Variables	Tendus/ Pivot (1) (ou expert)	Fléchis/ Pivot (2)	Fléchis/ sans pivot (3) (ou novice)	Sign. stat.	Effet <u>iambes</u> 1 vs 2	Effet <u>exper- tise</u> 1 vs 3	Effet <u>pivot</u> 2 vs 3
Durée totale (s)	3.13 (.48)	3.29 (.59)	2.27 (.42)	0.000	NS	0.000	0.002
Durée: charge supportée par travailleurs (s)	1.34 (.13)	1.39 (.09)	1.66 (.26)	0.003	NS	0.009	0.028
Longueur parcours: charge supportée (m)	0.96 (.08)	0.94 (.09)	1.10 (.10)	0.001	NS	0.009	0.001
Distance max. de caisse à L5/S1 (m)	0.91 (.04)	0.94 (.05)	0.98 (.05)	0.000	0.028	0.001	0.002
Excursion de l'angle lombo- sacré (L5/S1) (°)	37 (5)	38 (8)	40 (5)	NS	NS	NS	NS
Angle du tronc min (°) ^a	-118 (5)	-97 (13)	-88 (10)	0.000	0.006	0.000	0.001
Angle du tronc max. (°) ^a	-62 (3)	-61 (5)	-58 (7)	NS	NS	NS	NS
Excursion angle du tronc (°)	56 (7)	36 (12)	30 (11)	0.000	0.014	0.001	NS
Angle min genoux (°)	127 (16)	73 (15)	55 (10)	0.000	0.001	0.000	0.005
Angle max. genoux (°)	166 (7)	164 (8)	164 (9)	NS	NS	NS	NS
Excursion angle genoux (°)	40 (17)	90 (20)	108 (14)	0.000	0.002	0.000	0.002
Force déséquilibrante à la prise (N)	184 (51)	220 (30)	215 (61)	NS	NS	NS	NS
Force déséquilibrante au dépôt (N)	82 (24)	80 (19)	73 (22)	NS	NS	NS	NS

^a Le signe négatif signifie une flexion (0° est la position debout)

Tableau 13. Moyennes et écarts types pour les chargements lombaires et les moments musculaires relatifs aux stratégies de flexion des genoux et de pivot de la charge (N = 7).

Variables	Tendus/ Pivot (1) (ou expert)	Fléchis/ Pivot (2)	Fléchis/ sans pivot (3) (ou novice)	Sign. stat.	Effet jambes 1 vs 2	Effet exper- tise 1 vs 3	Effet pivot 2 vs 3
Moment max. extenseurs des genoux (Nm)	16 (20)	82 (29)	73 (49)	0.003	0.001	0.038	NS
Moment max. fléchisseurs des genoux (Nm) ^a	136 (17)	131 (13)	139 (18)	NS			
Moment max. fléchisseurs coudes (Nm)	55 (12)	68 (13)	73 (18)	0.000	0.004	0.008	NS
Moment max. fléchisseurs épaules (Nm)	56 (17)	64 (14)	76 (20)	0.000	0.048	0.001	0.009
Moment max. extenseurs L5/S1 (Nm) ^b	238 (21)	256 (24)	264 (33)	0.016	0.044	0.025	NS
Force compression max. en L5/S1 (N) ^b	4819 (467)	5369 (365)	5587 (566)	0.001	0.014	0.004	NS
Force compression moyenne en L5/S1 (N)	2961 (269)	3345 (208)	4171 (388)	0.000	0.008	0.000	0.001

^a Occurrence au moment du dépôt

^b Occurrence près du moment de la prise

Tableau 14. Moyennes et écarts types pour les variables du travail mécanique relatifs aux stratégies de flexion des genoux et de pivot de la charge (N = 7).

Variables	Tendus/ Pivot (1) (ou expert)	Fléchis/ Pivot (2)	Fléchis/ sans pivot (3) (ou novice)	Sign. stat.	Effet jambes 1 vs 2	Effet exper- tise 1 vs 3	Effet pivot 2 vs 3
Travail total (J)	520 (82)	615 (80)	645 (114)	0.003	0.002	0.019	NS
<u>Distribution</u>							
Chevilles (J)	33 (13)	65 (14)	78 (19)	0.000	0.003	0.003	NS
Genoux (J)	38 (8)	56 (15)	66 (28)	0.017	0.028	0.047	NS
Hanches (J)	202 (33)	210 (33)	205 (41)	NS			
L5/S1 (J)	142 (20)	165 (33)	166 (32)	0.010	0.014	0.039	NS
Épaules (J)	70 (32)	77 (28)	88 (28)	NS			
Coudes (J)	36 (19)	42 (12)	43 (23)	NS			



Figure 1

Illustration de la prise lors de la technique genoux très fléchis avec base large

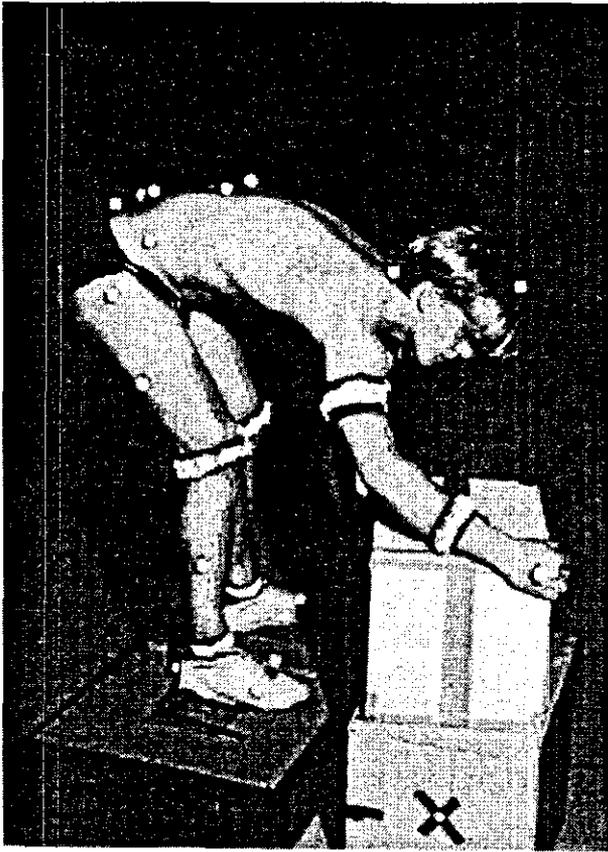


Figure 2
Illustration de la technique genoux légèrement fléchis et de la technique genoux très fléchis

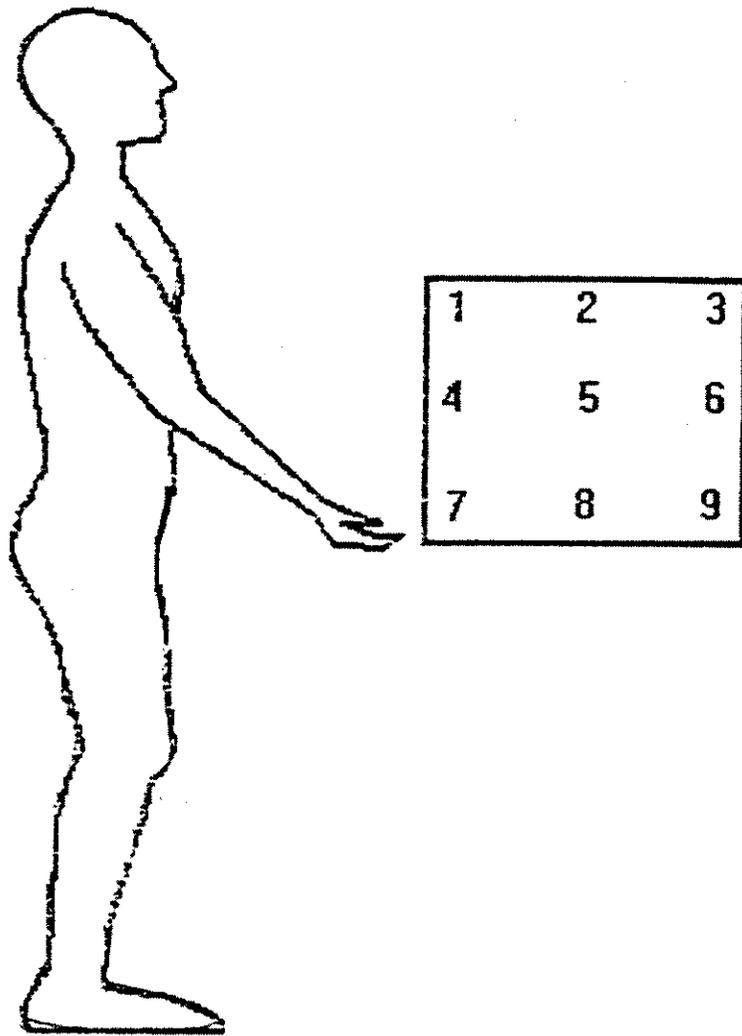


Figure 3
Convention pour les prises selon Drury et al. (1982).

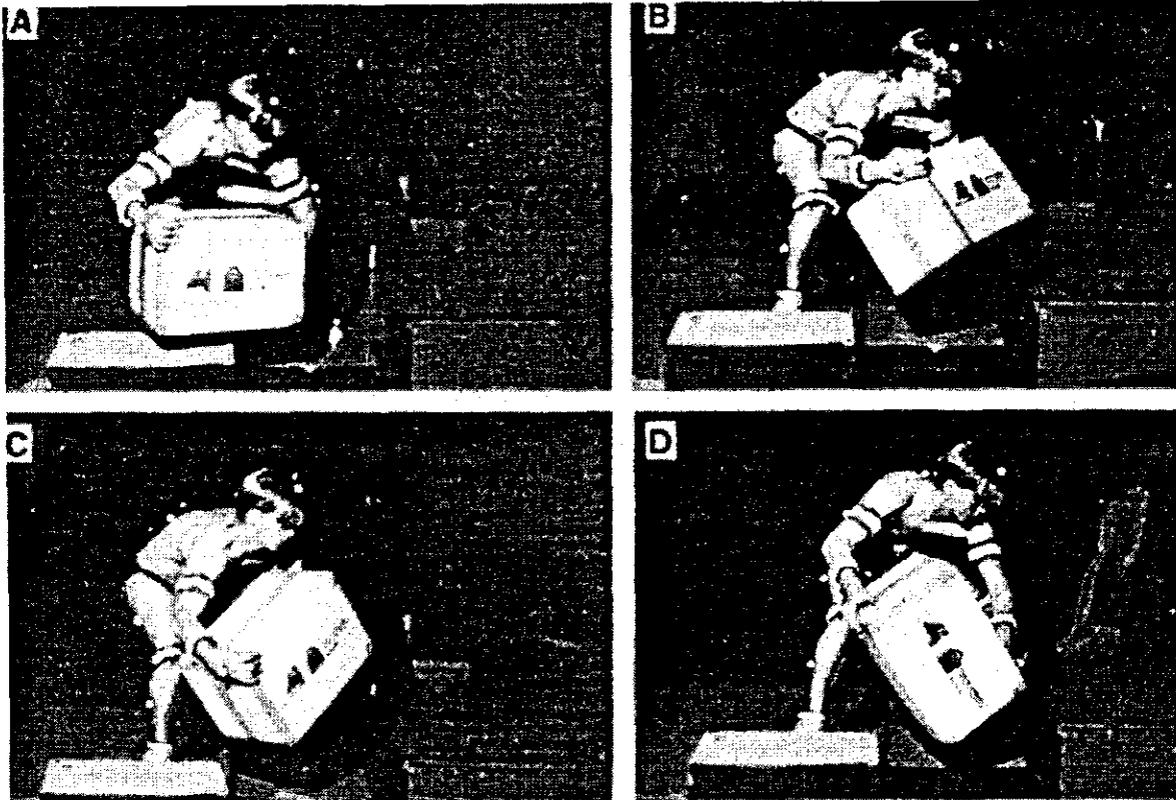


Figure 4

Illustration des tâches selon différentes techniques d'inclinaison de boîte :

a) à plat, prises 3/7

b) inclinaison arrière, prises 3/7;

c) inclinaison à droite, prises 3/7;

d) inclinaison à gauche, prises 8/2.

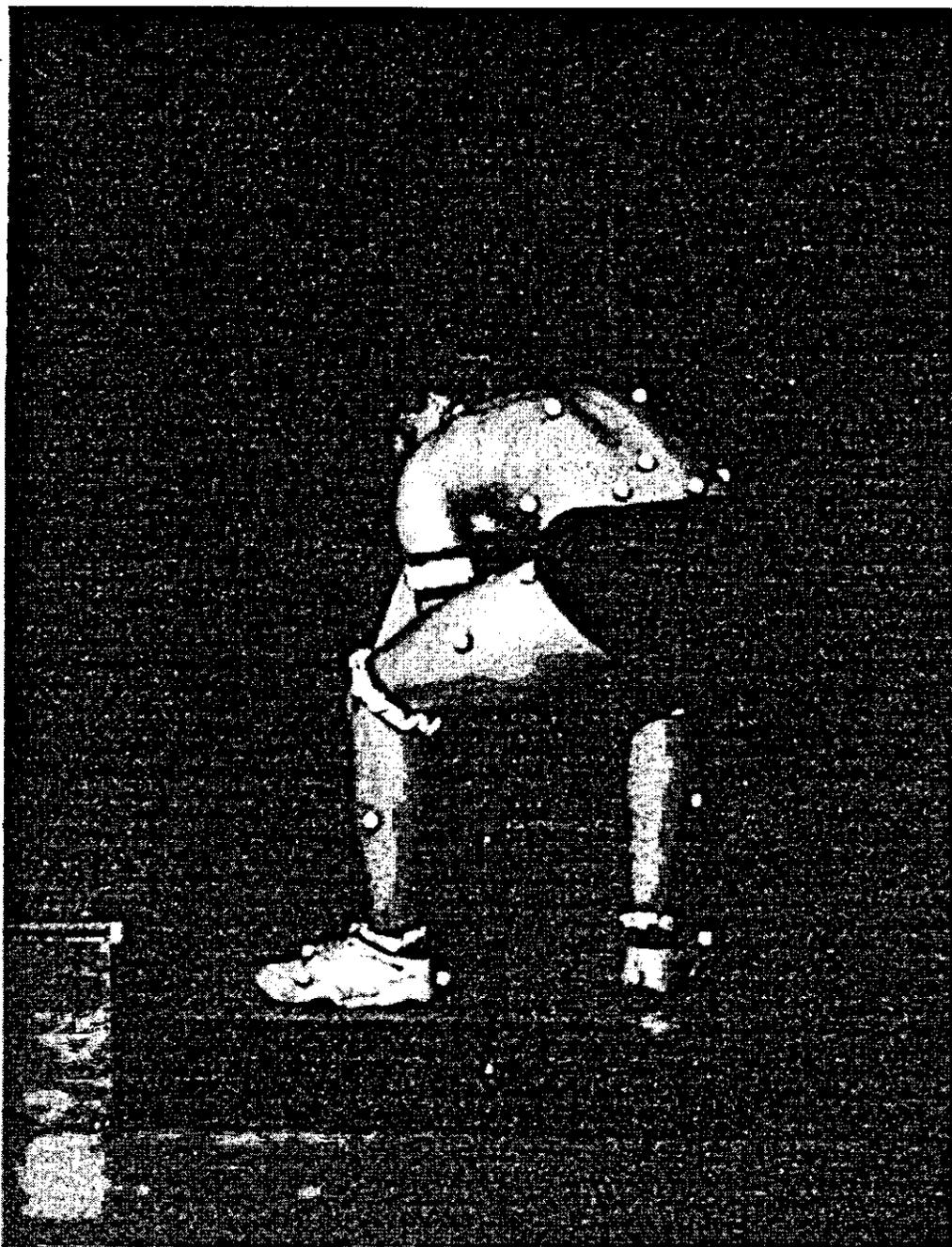


Figure 5

Illustration d'un transfert de charge selon le mode des experts par pivots alternatifs des pieds gauche et droit. Sur la séquence présentée seul le pivot sur pied gauche est complété.

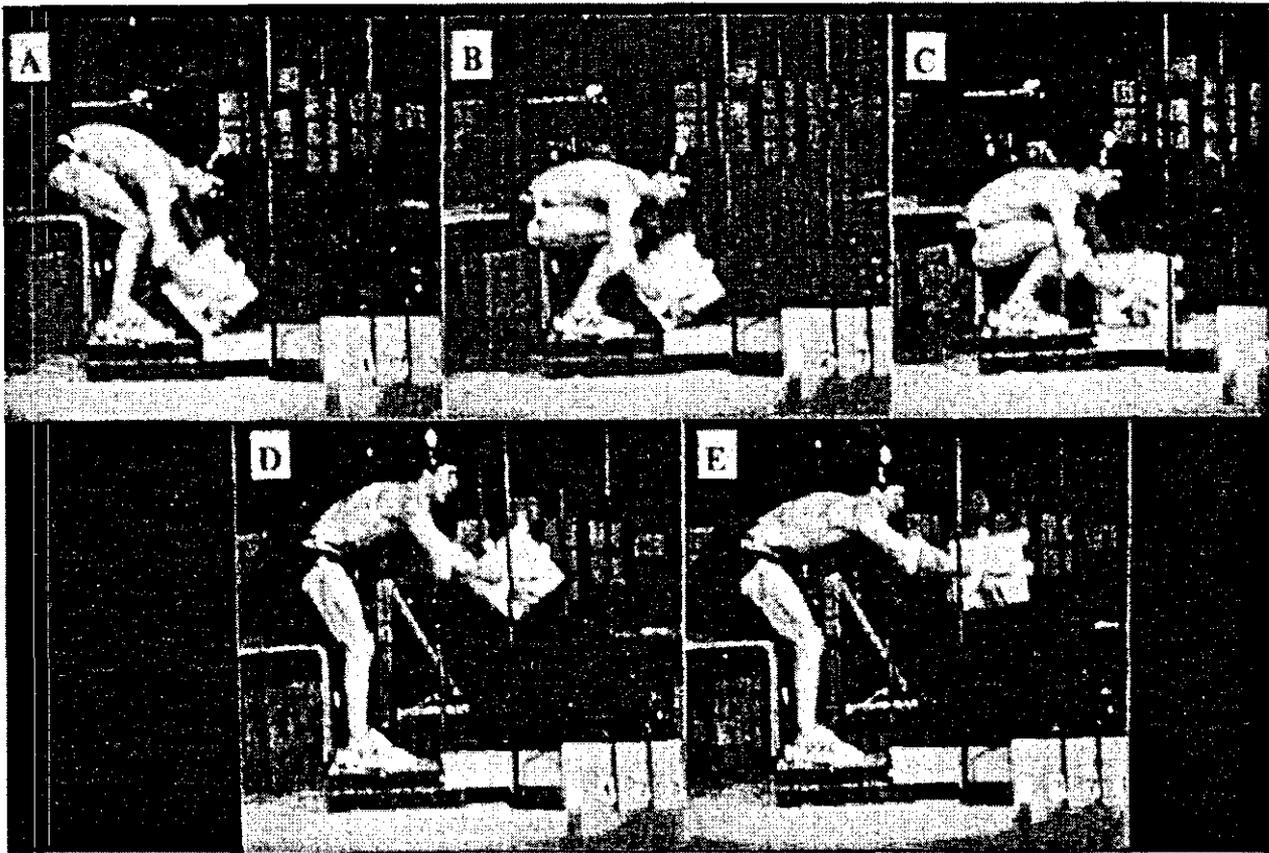


Figure 6

Postures corporelles à la prise et au dépôt pour la stratégie de flexion réduite des genoux et d'inclinaison de la boîte (A, D), pour la stratégie de flexion prononcée des genoux et d'inclinaison de la boîte (B,D) et pour la stratégie de flexion prononcée des genoux, sans inclinaison de la boîte (C,E)