

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

Mémoire présenté à

l'Université du Québec à Trois-Rivières

comme exigence partielle

de la Maîtrise en sciences de l'activité physique

PAR

JEAN-DANIEL MBOUNGOU

Analyse biomécanique comparative de deux techniques  
d'élévation de charges dans les plans sagittal et  
hors sagittal

Février 1994

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## TABLE DES MATIÈRES

### CHAPITRE I

|                    |   |
|--------------------|---|
| INTRODUCTION ..... | 1 |
| Hypothèses .....   | 4 |

### CHAPITRE II

|   |    |
|---|----|
| REVUE DE LA LITTÉRATURE .....   | 5  |
| Mécanismes articulaires, chargement de la<br>colonne vertébrale et précisions sur la notion<br>de répartition des pressions sous chaque pied... | 5  |
| Dimensions des caisses, prises de caisses avec<br>ou sans poignées .....  | 7  |
| Techniques de manutention .....   | 9  |
| Force d'élévation et d'abaissement de charges<br>en regard de la force verticale .....  | 11 |

### CHAPITRE III

|  |    |
|--|----|
| MÉTHODOLOGIE .....                               | 14 |
| Sujets .....                                     | 14 |
| Plan expérimental .....                          | 15 |
| Description des tâches .....                     | 17 |
| Appareillage et enregistrement des données ..... | 19 |
| Procédures .....                                 | 22 |

### CHAPITRE IV

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| RÉSULTATS .....                      | 24 |
| Force verticale totale .....         | 25 |
| Indice d'asymétrie de l'effort ..... | 28 |

## CHAPITRE V

|                  |    |
|------------------|----|
| Discussion ..... | 33 |
| Références ..... | 38 |
| ANNEXE           |    |
| Tableaux .....   | 45 |

## LISTE DES FIGURES

| FIGURES  | Pages |
|--|-------|
| 1. Différentes caractéristiques du milieu expérimental.....  | 17    |
| 2. Présentation des deux techniques de manutention....   | 18    |
| 3. Position du sujet dans le plan transversal lors du placement des charges à gauche, au centre et à droite.....   | 19    |
| 4. Diagramme d'arrangement des appareils .....   | 21    |
| 5. Moyenne de l'intégrale de force en fonction de la direction et de la technique de levage.....   | 28    |
| 6. Moyenne des indices d'asymétrie pour les trois directions de levage en fonction du poids des caisses.....   | 31    |
| 7. Moyenne de l'indice d'asymétrie de la force en fonction de la direction du levage, pour le premier tiers et le troisième tiers de la période de levage..... | 32    |
| 8. Reproduction graphique des données du Tableau 5....   | 53    |
| 9. Reproduction graphique des données du Tableau 6....   | 56    |
| 10. Sujet GT, caisse vide au centre, technique GD-DF...  | 57    |

## LISTE DES TABLEAUX

| TABLEAUX   | Pages |
|--|-------|
| 1. Caractéristiques des sujets.....  | 15    |
| 2. Exemple d'une séquence expérimentale pour un<br>sujet.....  | 16    |
| 3. Analyse de variance de l'intégrale de la courbe de<br>force totale en fonction des conditions de<br>l'expérimentation.....  | 26    |
| 4. Analyse de variance de l'indice d'asymétrie de<br>force en fonction des conditions de<br>l'expérimentation et de la phase du mouvement.....                             | 30    |
| 5. Données brutes recueillies par le système Apple II<br>(exemple d'un essai effectué par le sujet PP, en<br>combinaison GD-DF, caisse vide, au centre).....               | 49    |
| 6. Données vincentisées et moyennées correspondant à<br>la période de support de la caisse par le sujet<br>PP, en combinaison technique GD-DF, caisse vide,<br>centre..... | 54    |
| 7. Intégrale totale nette de Zsomme.....   | 58    |
| 8. Indice d'asymétrie des forces.....  | 59    |

## RÉSUMÉ

Le progrès des connaissances et le développement technologique ont amené une meilleure compréhension des problèmes d'ordre biomécanique liés à la manutention de charges, ce en vue de l'utilisation d'une technique plus sécuritaire et d'une réduction des accidents au travail.

En effet, parmi les tâches responsables de blessures au dos, il est démontré dans le rapport de Brown (1971) que 87% des blessures se retracent dans des situations diverses de manutention, incluant le levage de charges. Cette étude a pour but d'examiner l'impact de deux techniques de manutention souvent employées pour soulever des objets hors du plan sagittal; soit genoux fléchis-dos droit (GF-DD) et genoux droits-dos fléchi (GD-DF), en regard de la répartition des pressions exercées sous chaque pied; une tâche de contrôle, où le levage a lieu dans le plan sagittal, sera aussi effectuée. Quatre étudiants universitaires de sexe masculin ont participé à cette expérimentation. Ces sujets ont utilisé les deux techniques de manutention de charge et manipulé deux charges différentes (71,6 et 169,7 N), ce en combinaison avec trois directions du placement de la caisse (au centre, 20 cm à gauche et 20 cm à droite)

Sur les trois hypothèses émises au départ, seule la deuxième se trouve confirmée: la répartition des forces verticales sous chaque pied diffère selon la direction du mouvement, tel

que le montre l'indice d'asymétrie des forces que nous avons calculé. Ce résultat confirme qu'à l'asymétrie globale du mouvement (lorsque la caisse est déposée de côté), correspond aussi une asymétrie dynamique, reflet d'une compensation d'équilibre plus importante au niveau des membres inférieurs. Il est étonnant de constater que l'indice d'asymétrie apparaît beaucoup plus grand pour les mouvements à gauche plutôt qu'à droite. Les sujets, tous droitiers, compensaient davantage un équilibre sans doute plus précaire lorsque leur mouvement se faisait du côté opposé à la main dominante.

La première hypothèse, quant à elle, stipulant que la technique genoux droits-dos fléchi entraîne une pression verticale mesurée aux pieds supérieure à la technique genoux fléchis-dos droit, n'a pas été confirmée par nos résultats. La théorie appuyant cette hypothèse voulait que la technique GF-DD permette l'enregistrement de forces verticales inférieures aux pieds, allouant ainsi une distribution de pression moins grande dans les autres régions de l'organisme, i.e., une réduction des pressions au niveau de la région lombaire, entre autres.

Cependant, la forte variabilité des données obtenues pourrait expliquer l'absence de résultats significatifs; de plus, le nombre peu élevé de sujets a sûrement grevé la puissance de l'analyse. Il semble donc que la technique dite ergonomique (GF-DD) ne présente pas les avantages qu'on semble lui attribuer au plan des forces verticales exercées sous les



pieds, lorsque comparée à l'autre technique GD-DF. En examinant l'interaction entre la force verticale déployée par les sujets lors de l'exécution des deux techniques et l'orientation du levage, il est surprenant de constater l'écart entre les deux techniques lors du levage effectué à gauche, la technique GF-DD exigeant davantage de force verticale alors que l'inverse est enregistré dans le cas de l'autre technique (GD-DF). Ce résultat curieux, difficile à comprendre, pourrait supporter, en partie, le manque de stabilité des mouvements effectués à gauche.

La troisième hypothèse voulant que les techniques diffèrent en termes d'asymétrie de force sous les deux pieds n'est pas supportée par les résultats de l'expérimentation. Seul le poids des caisses a eu un impact sur l'indice d'asymétrie avec, encore une fois, un effet particulier pour les levées effectuées à gauche. Le problème de stabilité évoqué précédemment pour les mouvements à gauche se manifeste ici par une valeur remarquablement élevée de l'indice d'asymétrie. C'est comme si le sujet droitier, voulant déposer la caisse à sa gauche, devait exercer des pressions compensatoires du pied gauche pour maintenir un certain niveau d'équilibre.

## REMERCIEMENTS

Les résultats consignés dans ce mémoire constituent la trace de mon passage au Département des sciences de l'activité physique de l'Université du Québec à Trois-Rivières. C'est l'aboutissement de mon séjour de trois ans dans ce département, séjour durant lequel je fus initié à la compréhension des phénomènes biomécaniques.

Le Département des sciences de l'activité physique de l'Université du Québec à Trois-Rivières m'a permis de me rendre compte que c'est par l'effort incessant, la bonne volonté, le sacrifice et la collaboration entre les différents chercheurs du département que l'on peut arriver à un meilleur rendement intellectuel. Ainsi, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont apporté leur soutien pour mener à bien mon projet de mémoire.

Monsieur Jacques Dessureault, PhD, est mon directeur de mémoire. Il m'a initié à l'analyse biomécanique et à quelques-unes de ses méthodes. Il a généreusement consacré son temps pour m'encourager, répondre à mes questions et m'assister moralement. Toujours prêt à me soutenir dans mon travail, il n'a jamais cessé d'éclairer certains aspects qui

étaient obscurs dans mon esprit. Il sait tout ce que je lui dois. Qu'il trouve ici l'expression de mes remerciements et de mon admiration.

À côté de Monsieur Jacques Dessureault, je tiens à mettre en évidence la contribution de Monsieur Louis Laurencelle, PhD, co-directeur de ce travail. Grâce à lui, l'analyse et l'interprétation statistiques ont été facilitées. Il m'a formé entre autres à la rigueur et à l'esprit critique dans le traitement des données. Je lui formule de tout coeur mes remerciements pour l'aide variée dans ce travail.

L'assistance technique, utile au bon déroulement de la recherche, a été pleinement assurée par Monsieur Claude Brouillette, technicien en électronique; sans lui, les difficultés lors des expérimentations n'auraient pas été si bien surmontées. J'ai bénéficié de ses conseils techniques judicieux et de son aide constante. Je lui exprime mes remerciements.

Enfin, j'aimerais remercier Carl Beaumier, mon collègue d'études, de même que Réjean Drouin et Denis Marchand, M.Sc., qui tous m'ont été d'un grand secours.

## CHAPITRE I

### INTRODUCTION

Les activités impliquant déplacements et manutention d'objets sont souvent associées aux maux de dos, surtout à cause d'efforts mal dirigés ou excessifs, de faux mouvements, de chutes ou de glissades.

En effet, les maux de dos constituent le facteur principal d'absentéisme et d'incapacité au travail au Québec et dans plusieurs autres pays industrialisés (Abenhaim et Suissa, 1987; Damkot, Pope, Lord et Frymoyer, 1984). De même, une récente étude effectuée au Québec par la CSST (1991) souligne que 53% des affections rapportées sont reliées au dos. Ce *mal du siècle* constitue un casse-tête dans la société nord-américaine. Cela engendre un problème majeur pour les travailleurs, surtout ceux qui sont au milieu de leur vie active (35-45 ans); environ 80 millions de Nord-Américains souffrent de maux de dos (CSST, 1991). Parallèlement, une analyse du profil statistique des lésions au dos, réalisée au Québec par l'IRSST (Gervais et Hébert, 1987), indique que 90% des lésions se retrouvent sous deux groupes: ce sont les douleurs comme les cervicalgies,

dorsalgies et lombalgies d'une part, ainsi que les entorses et conflits disco-ligamentaires d'autre part.

La manutention de diverses charges dans le milieu industriel est reconnue depuis quelques années comme un facteur important de maux de dos chez les travailleurs. Une étude faite aux États-Unis par Snook (1978) révèle que 23% des compensations d'accidents de travail sont reliées à la manutention de matériels divers et que 79% des accidents de ce type sont des blessures constatées à la partie inférieure du dos. Au Canada, Gervais et Hébert (1987) ont rapporté qu'en 1981, les maux de dos représentaient environ 25% des blessures compensées et comptaient pour plus du tiers des montants versés en indemnisation.

En général, la manipulation des charges lourdes (lever, tirer, pousser et transporter) serait un des facteurs provoquant les maux de dos (Bush, Schipplein, Andersson et Andriacchi, 1988; Ciriello et Snook, 1983; Cook et Newman, 1987; Genaidy, Asfour, Mital et Tritar, 1988). De plus, il semble que les tâches impliquant une combinaison de torsion et de flexion du tronc soient encore plus à risque pour le dos (Snook, 1978; Manning, Mitchell et Blanchfield, 1984; Bhattacharya et Ghista, 1985; Drury, Deeb, Hartman, Woolley, Drury et Gallagher, 1989).

C'est pourquoi, la présente étude portera sur le levage d'une caisse placée en deux endroits distincts, c'est-à-dire

à la droite et à la gauche du manutentionnaire et ce, en référence à une tâche contrôle qui s'effectuera dans le plan sagittal. La manutention de la caisse nécessitera de légères torsions du tronc vers la droite et vers la gauche: l'on tiendra compte de la répartition des pressions sous chaque pied. Actuellement, peu d'études ont été réalisées sur des tâches de manutention effectuées dans un plan autre que sagittal en mesurant les pressions exercées sous chaque pied. Par cette étude, nous espérons faire avancer le champ des connaissances, encore très limité, dans ce domaine.

L'objectif de l'étude est de déterminer certains aspects dynamiques du levage de charge, utilisant deux techniques, soit "genoux droit-dos fléchi" (GD-DF) et "genoux fléchis-dos droit" (GF-DD), et un placement latéral de la charge.

Cette étude est originale de deux manières; d'une part, le sujet effectue les mouvements d'élévation de charges selon un patron spontané, les seules restrictions qui lui sont imposées étant l'endroit où il doit déposer la charge (sur sa droite ou sa gauche, ou devant lui) ainsi que la localisation de la charge en début et en fin de cycle. D'autre part, afin de voir de façon plus précise le "comment" de la technique utilisée pour manutentionner des objets, nous enregistrerons la pression exercée sous chaque pied lors de la montée des charges, laquelle pression à notre connaissance n'a jamais été considérée auparavant dans ce contexte.

## **Hypothèses**

Lorsqu'on compare les deux techniques (GF-DD, GD-DF) de manutention utilisées dans la présente étude, dans les mouvements de levage d'objets (caisse pleine ou vide), nous pouvons proposer les hypothèses suivantes:

- 1- La technique GD-DF entraîne une pression mesurée aux pieds supérieure à la technique GF-DD.
- 2- La répartition des forces verticales exercées sous chaque pied diffère en fonction de la latéralité des mouvements.
- 3- La différence des pressions mesurées d'un pied à l'autre est influencée par la technique de manutention.

## CHAPITRE II

### REVUE DE LA LITTÉRATURE

Afin de bien apprécier la question des maux de dos, la présente revue de la littérature se répartit selon quatre grands thèmes: définition des mécanismes articulaires et du chargement de la colonne vertébrale et précisions sur la notion de répartition des pressions sous chaque pied; caractéristiques physiques des caisses (masse des caisses, les prises de caisses avec ou sans poignées, etc.); techniques de manutention; et la force d'élévation de charges en regard de la force verticale.

#### **Mécanismes articulaires, chargement de la colonne vertébrale et précisions sur la notion de répartition des pressions sous chaque pied**

Le rapport de NIOSH (1981) signale que la manutention de matériel peut avoir des effets aussi bien à long terme qu'à court terme sur la santé des travailleurs. D'une part, les effets à court terme comprennent des blessures comme les lacérations, les contusions ou les fractures produites par la chute du travailleur ou du matériel, par des collisions ou



par des chargements mécaniques excessifs du système musculo-squelettique (Smyth, 1992). D'autre part, les problèmes de dos peuvent accidentellement être provoqués par des coups directs ou le plus souvent par des facteurs indirects comme des mouvements incorrects lors des activités de levage (Farfan, Gracovetsky et Helleur, 1985). Par ailleurs, lorsqu'on se tient debout et que le maintien de cette posture n'entraîne pas de travail de la part des muscles spinaux et abdominaux, l'articulation lombo-sacrée et la colonne vertébrale ne supportent que le poids des segments placés au dessus d'eux (Basmajian, 1967; Morris, Lucas et Bresler, 1961). Cependant, la flexion du tronc vers l'avant peut provoquer de très fortes tensions au bas du dos (Strait, Inman et Ralston, 1947); un homme de 90 kg qui incline le tronc de 60 degrés par rapport à la verticale et dont les bras pendent librement subit une force de compression de 2250 N au niveau de la cinquième vertèbre lombaire; si, en plus, il soulève une charge de 250 N, la force de compression augmente jusqu'à environ 4250 N. Nachemson et Elfstrom (1970) confirment ces faits par des mesures faites lors de tâches de manutention. Aussi, le poids de la caisse maintenue dans les mains contribue, avec le poids des segments corporels, à produire des moments substantiels aux articulations; toutes choses étant égales d'ailleurs, une augmentation du poids manipulé aura donc comme effet d'accroître les moments articulaires ainsi que le chargement aux articulations (Schultz, Andersson, Örtengren, Björk et

Nordin, 1982). En effet, au niveau du dos, les moments musculaires nets et la force de compression agissant au niveau des disques intervertébraux sont souvent utilisés comme mesures du chargement puisqu'il a été démontré que ces forces pouvaient être la cause de blessures au niveau lombaire (Morris et al., 1961; Nachemson, 1962).

L'augmentation du poids manipulé influence donc les forces de réaction verticales mesurées aux pieds (Konz, Dey et Bennet, 1973). Certains auteurs ont émis l'hypothèse que l'amplitude des forces aux pieds pourrait se refléter directement sur les chargements à la colonne vertébrale (Konz et Goetzee, 1978). De même, Perkins et Konz (1974) ont rapporté un effet significatif du poids sur les forces de réaction verticale aux pieds lors d'activités de levage de caisses, indiquant cependant que non seulement le facteur "caisse", mais aussi la combinaison du poids du sujet et du poids de la caisse demeurerait la source de stress la plus importante, ce qui fut confirmé par Schultz et al. (1982) concernant les chargements lombaires. Pour les besoins de cette étude, nous avons retenu au niveau de la variable du poids des caisses les valeurs suivantes, caisse pleine: 169,7 N (17,3 kg), caisse vide: 71,6 N (7,3 kg).

### **Dimensions des caisses, prises de caisses avec ou sans poignées**

Smyth (1992) souligne que les dimensions des caisses manipulées, précisément la largeur (mesurée dans le plan

sagittal), apparaissent être une des causes déterminant le chargement aux articulations (Chaffin, 1985). Garg et Saxena (1980), par contre, indiquent que la variation en largeur ou en longueur d'une boîte sans poignées ne semble pas avoir d'effets substantiels sur la charge maximale acceptable qu'un sujet pourrait lever sans danger. Deux études de Ciriello et Snook (1978, 1983) ont traité de l'influence de la longueur et de la largeur des caisses avec poignées sur le poids maximal acceptable que des sujets pouvaient lever; la largeur avait un effet significatif pour les levages à partir du sol sur une distance verticale de 51 cm, le poids maximal acceptable diminuant de façon significative avec un accroissement de la largeur de la caisse de 36 à 49 et à 75 cm. Pour notre étude, les dimensions de caisses retenues sont les suivantes; longueur de la caisse: 45 cm, largeur de la caisse: 27,50 cm.

Smyth (1992) souligne que plusieurs chercheurs ont étudié l'effet de la présence de poignées, leur forme, la position de celles-ci sur la caisse et leur angle et ce, par rapport à des variables biomécaniques. Freivalds, Chaffin, Garg et Lee (1984) ont obtenu des résultats au niveau des forces de compression L5/S1 moindres pour des caisses sans poignées que pour des caisses avec poignées lors de levages de poids maximaux acceptables. Enfin, bien que les études de caisses avec poignées soient plus nombreuses, peu de caisses en ont et, si elles en ont, elles ne sont pas nécessairement

utilisées. La présente étude utilise des caisses avec poignées.

### **Techniques de manutention**

On a commencé à s'intéresser à la cinétique du soulèvement de charges lourdes depuis quelques années seulement. Après avoir étudié le mouvement des régions dorsale et lombaire de la colonne lors de telles activités, Davis (1959) conclut que c'est lorsqu'on commence à soulever une charge que les forces au niveau du dos sont à leur maximum. Grieve (1974) a confirmé cette affirmation en montrant que les plus grandes forces apparaissent durant les quatre premiers dixièmes de seconde de l'activité. De plus, il compare les mouvements et les vitesses résultantes pour deux techniques de soulèvement différentes; la première étant une technique avec genoux fléchis et dos droit, et la seconde avec genoux droits et dos fléchi. De même, lorsque le manutentionnaire se tient debout prêt à soulever la charge, rien ne se passe à l'articulation lombo-sacrée. Mais, dès qu'il se penche vers l'avant, genoux fléchis et dos droit, pour soulever la caisse, aussitôt les muscles erector spinae entrent en action pour contrebalancer la force de gravité; au fur et à mesure que le degré d'inclinaison du tronc augmente, ces muscles dénotent de plus en plus de tension. Toutefois, lorsque la flexion est complète, ils deviennent silencieux: seuls les ligaments supportent la charge totale (MacConaill et Basmajian, 1969). Smyth (1992) souligne que peu de

modèles ont inclus ces effets distincts sur les chargements au niveau de la colonne lombaire; on les a plutôt considérés globalement pour les représenter dans les modèles au moyen d'une seule structure musculo-ligamentaire. Anderson, Chaffin, Herrin et Matthews (1985) et Gracovetsky, Farfan et Lamy (1977) ont inclus cette composante dans leurs modèles respectifs. Plusieurs recherches font état d'une hauteur typique de 81 cm (Garg et Badger, 1986; Smyth, 1992). C'est pourquoi la présente étude retient une valeur de 81 cm comme hauteur de dépôt lors de la manutention.

Quant au mode de manutention, l'utilisation de deux techniques de levage des charges chez les manutentionnaires, à savoir GF-DD (genoux fléchis-dos droit) et GD-DF (genoux droits-dos fléchi), permettra de mieux comprendre ces techniques et leur impact possible dans la région lombaire. Smyth (1992) souligne que de nombreuses études portant sur ces techniques ont été publiées. Aussi, la formation des manutentionnaires dans le milieu industriel a longtemps mis l'accent sur la technique dite ergonomique (GF-DD) plutôt que la technique GD-DF, afin de réduire les forces de compression au niveau lombaire (Brown, 1971). Cependant, les ouvriers ne respectent pas toujours cette recommandation. Dans un même ordre d'idées, Garg et Herrin (1979) ont effectivement prouvé par des mesures biomécaniques que la technique GF-DD était loin d'être bien justifiée. Ainsi, ils ont démontré que dans des situations où la caisse était trop longue pour être déplacée entre les genoux, la méthode GD-DF minimisait le

bras de levier de la charge à L5/S1 ainsi que la force de compression au niveau lombaire. Anderson et Chaffin (1986) ont obtenu des résultats différents pour la force de compression à L5/S1. En effet, Smyth (1992) souligne que la différence de technique semble être à l'origine de cette divergence; lorsque la caisse peut être déplacée entre les genoux, la méthode GF-DD est avantageuse puisqu'elle diminue le bras de levier dû à la charge. Ainsi, afin de réduire la charge au niveau de la colonne vertébrale, il est généralement recommandé lors du levage d'un objet de le placer entre les genoux en utilisant la technique GF-DD. Ciriello et al. (1983) ont démontré que le poids maximal acceptable pour des tâches d'élévation était plus faible que pour des tâches d'abaissement, ce aussi bien pour des manutentions basses (du sol jusqu'aux hanches) que pour des manutentions plus élevées (des hanches jusqu'aux épaules) et pour une variété de fréquences de manutention. Konz et Goetzee (1978) soulignent que les tâches d'élévation sont classées comme plus difficiles que les tâches d'abaissement. La présente étude se limite donc à la tâche d'élévation de caisses seulement.

### **Force d'élévation de charges en regard de la force verticale**

Évidemment, l'identification des tâches physiquement stressantes dans le milieu industriel a été l'objet de nombreuses recherches de façon à assurer notamment une

meilleure sélection des travailleurs pour la tâche. Smyth (1992) souligne que Chaffin et Anderson (1972) furent parmi les premiers à décrire une méthode pour estimer, chez un sujet particulier et une tâche donnée, les chargements relatifs aux articulations dans l'ensemble de la structure musculo-squelettique, en comparant les données de moments articulaires provenant d'un modèle biomécanique planaire quasi-statique avec des données de moment maximal estimées pour chaque articulation correspondante. Aussi, l'étude réalisée fit conclure à cet auteur que la limite dans la capacité de lever une charge pour un sujet résulte soit de la force limitée des muscles extenseurs du tronc (erector spinae), soit de la crainte de blessures à la colonne provenant d'une compression excessive. Cela entraîna des modifications du modèle original de Chaffin et Anderson (1972) présentant un certain nombre de courbes pour la prédiction de la capacité de levage, de poussée et de traction selon la position des mains pour les 50e et 95e percentiles de la population d'hommes et de femmes. Aussi, on constate que les plus lourdes charges et les boîtes à grandes dimensions augmentent le temps d'élévation, de même que les valeurs maximales des forces de réaction verticale du sol et les forces de compression au niveau L5/S1. Ainsi, ce modèle démontre que les forces de réaction verticale prédites sont significativement corrélées avec les forces de réaction verticale mesurées au sol. Par commodité et sur la base de cette corrélation, ce sont les forces exercées au sol, sous

chaque pied, qui constituent la variable dépendante de notre étude.



## **CHAPITRE III**

### **MÉTHODOLOGIE**

#### **Sujets**

Quatre sujets masculins, tous des droitiers, ayant une moyenne d'âge de 23 ans, un poids moyen de 79,65 kg et une taille moyenne de 177,5 cm (voir Tableau 1) ont, après l'explication des objectifs de l'étude et la signature d'un consentement écrit, volontairement participé à l'expérimentation. Leur normalité (antécédents médicaux, chirurgies, entorses, douleurs lombaires, etc.) est établie par une anamnèse visant à l'évaluation subjective de leurs capacités aux plans articulaire et musculaire.

**Tableau 1**

Caractéristiques des sujets

| Sujet          | 1    | 2    | 3   | 4    | Moyenne | Écart-type |
|----------------|------|------|-----|------|---------|------------|
| Âge            | 22   | 24   | 23  | 24   | 23,25   | 0,96       |
| Poids<br>(kg)  | 89,3 | 65,1 | 80  | 84,2 | 79,65   | 10,42      |
| Taille<br>(cm) | 178  | 175  | 174 | 183  | 177,5   | 4,04       |

**Plan expérimental**

L'étude comporte 12 conditions expérimentales obtenues par la combinaison de deux techniques de manutention (genoux droits-dos fléchi: GD-DF, genoux fléchis-dos droit: GF-DD), de deux charges (caisse vide: 71,6 N, caisse pleine: 169,7 N) et de trois directions du placement des charges, à savoir 20 cm à gauche (approximativement  $-15^{\circ}$ ), au centre et 20 cm à droite (approximativement  $+15^{\circ}$ ).

Chacune des conditions expérimentales sera réalisée trois fois par sujet, deux essais étant retenus pour fins d'analyse, ceux dans la durée d'exécution étaient les plus semblables. Le tableau suivant présente un schéma de l'ensemble des conditions expérimentales dans la présente étude.

**Tableau 2**

Exemple d'une séquence expérimentale pour un sujet<sup>1</sup>

| Présentation<br>séries | 1                                  | 2                                  | 3                                  | 4                                  |
|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1                      | (A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> ) i | (A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> ) j | (A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> ) i | (A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> ) j |
| 2                      | (A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> ) j | (A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> ) i | (A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> ) j | (A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> ) i |
| 3                      | (A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> ) i | (A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> ) j | (A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> ) j | (A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> ) i |
| 4                      | (A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> ) j | (A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> ) i | (A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> ) i | (A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> ) j |

<sup>1</sup>Les variables sont les suivantes:

A = (Techniques): A<sub>1</sub> = GF-DD, A<sub>2</sub> = GD-DF

B = (Caisses): B<sub>1</sub> = caisse vide, B<sub>2</sub> = caisse pleine

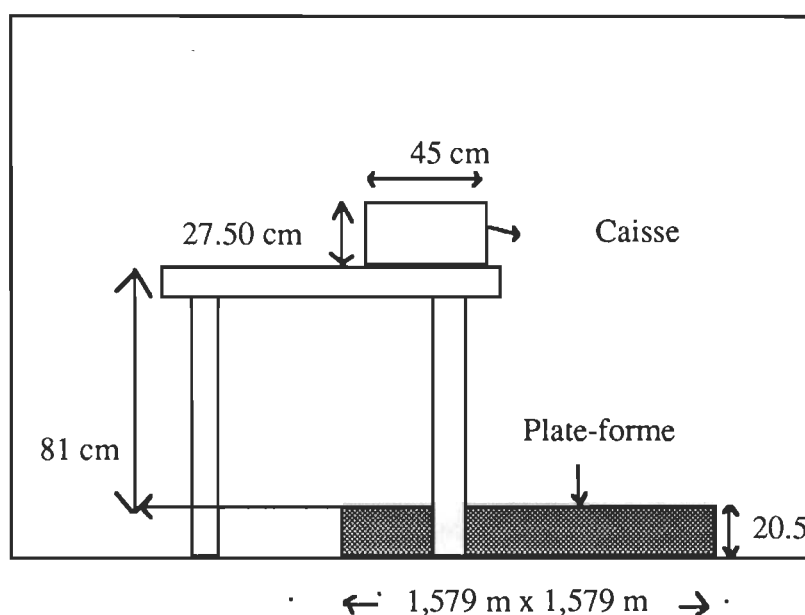
i, j = séquences des directions de placement pour 9 mouvements de levage (voir texte).

Ce Tableau 2 représente un exemple de séquences expérimentales grâce auxquelles les conditions de technique (A) et de caisse (B) furent réparties au hasard. Chaque condition de type (A<sub>x</sub>B<sub>y</sub>) est réalisée pour chaque direction (gauche, centre et droite), trois fois consécutives, ce qui fait 9 essais. Pour contrebalancer l'effet de séquence dans les directions, celles-ci (g, c, d) sont permutées: l'indice "i" dans le Tableau 2 représente la séquence g, c, d, c, d, g, d, g, c, et l'indice "j" représente g, d, c, c, g, d, d, c, g.

L'effet de séquence, qui peut résulter de l'ordre de présentation des variables A et B à l'intérieur de chaque série, fut réduit en mêlant au hasard les quatre séries, pour chaque sujet.

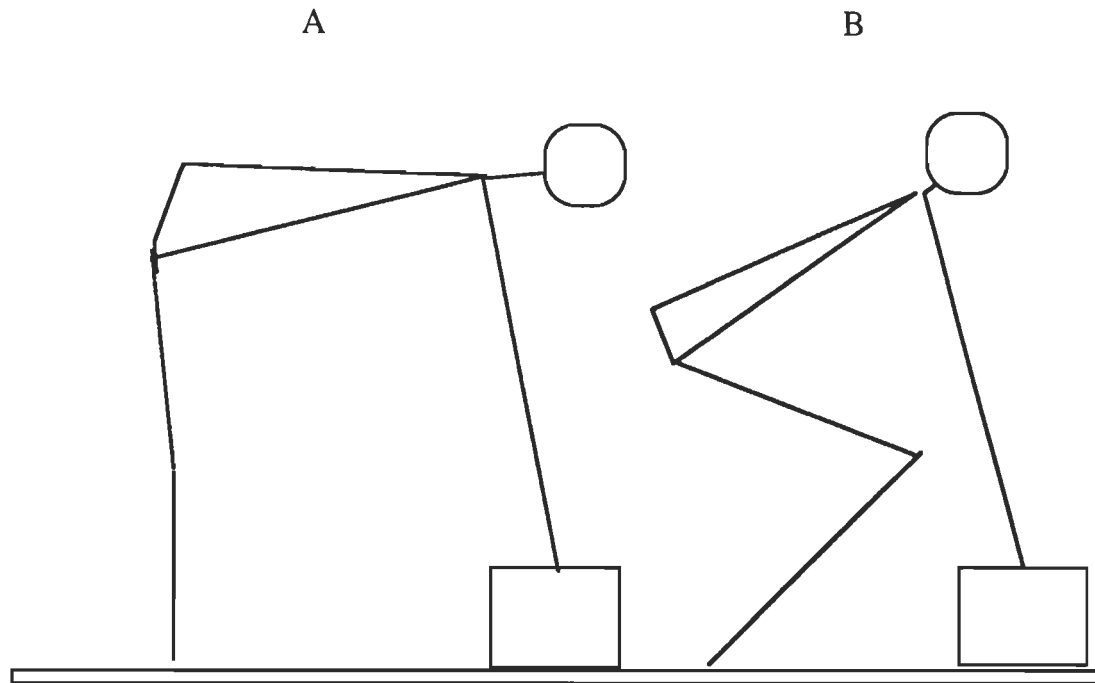
### Description des tâches

Tout d'abord on explique aux sujets les caractéristiques de l'environnement expérimental, tel que schématisé à la Figure 1.



**Figure 1.** Différentes caractéristiques du milieu expérimental.

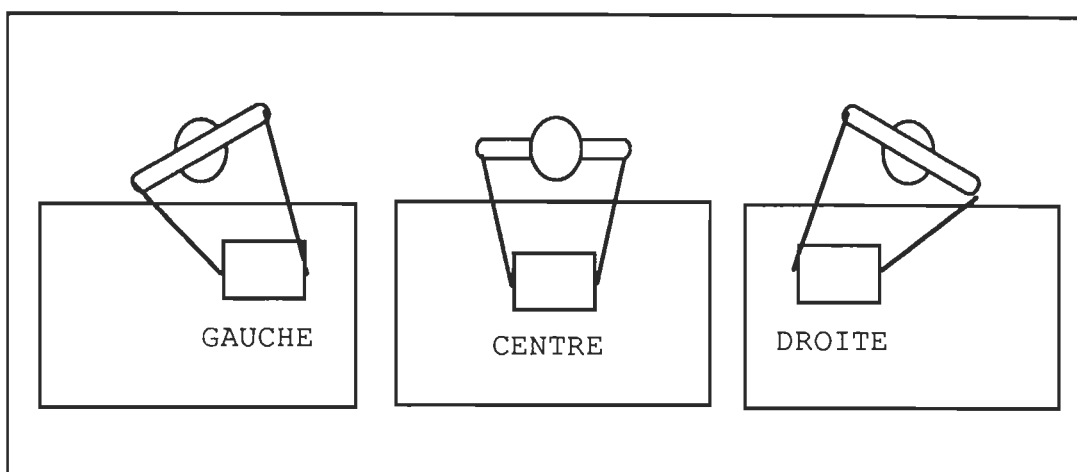
La Figure 2 [A (genoux droits-dos fléchi) et B (genoux fléchis-dos droit)] présente les deux techniques que le sujet utilise selon les conditions de l'expérimentation.



**Figure 2.** Présentation des deux techniques de manutention.

La Figure 3 présente une vue des sujets dans le plan transversal lors du placement des charges dans chacune des trois directions soit au centre, 20 cm à droite et 20 cm à gauche.

Le rythme d'exécution du mouvement par les sujets est maintenu assez constant dans les différentes séries.



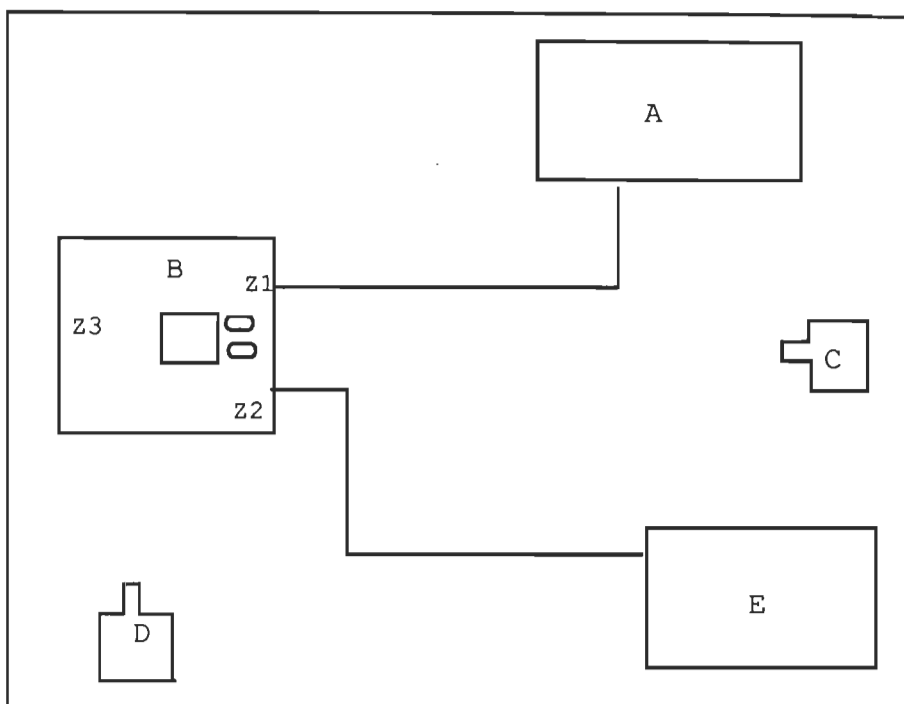
**Figure 3.** Position du sujet dans le plan transversal lors du placement des charges à gauche, au centre et à droite.

### **Appareillage et enregistrement des données**

La plate-forme de force contient des colonnes montées de jauges de contrainte capables de détecter jusqu'à 9800 N en direction verticale. Cette force verticale est obtenue en faisant la somme des forces provenant de trois supports différents, ces trois derniers étant identifiés par  $Z_1$ ,  $Z_2$  et  $Z_3$  (Figure 4). La présente étude utilise les deux colonnes  $Z_1$  et  $Z_2$  près desquelles les deux pieds sont déposés, le gauche sur  $Z_2$  et le droit sur  $Z_1$ . Ainsi, la force verticale est obtenue en faisant la somme  $Z_1 + Z_2 + Z_3$  alors que la répartition des forces verticales exercées sous chaque pied provient des colonnes  $Z_1$  et  $Z_2$ , pour les pieds droit et gauche respectivement. La calibration de la plate-forme a été effectuée avant et après chaque séance d'enregistrement

en faisant monter le sujet en trois endroits distincts de la plaque ( $Z_1$ , centre et  $Z_2$ ). Ces trois positions utilisées lors de l'étalonnage sont aussi représentées à la Figure 4.

Deux contacts électriques permettent de déterminer le début et la fin du mouvement de levage: l'un est installé sur la plaque de force, l'autre sur la table servant au dépôt de la caisse. Ces contacts sont couplés à une lumière stroboscopique qui permet de déterminer le début et la fin du levage et ils permettent de synchroniser les signaux émanant de la plate-forme et les images vidéo provenant des deux caméras.



Légende: A = système d'acquisition des données; B = plate-forme de force, caisse et sujet; C et D = caméras vidéo synchronisées; E = télévision et moniteur.

**Figure 4.** Diagramme d'arrangement des appareils.

Ensuite, les données de force de la plate-forme, acquises par un système Apple II au rythme de 72 échantillons/s par canal en 12 bits, sont ensuite transférées à l'ordinateur Macintosh Plus. Enfin, ces données sont soumises à une série de traitements aboutissant aux moyennes associées aux différentes conditions expérimentales et l'analyse de variance.



## Procédures

L'expérimentation se déroule dans le Laboratoire de Biomécanique humaine de l'Université du Québec à Trois-Rivières, au pavillon Michel-Sarrazin. Dès son arrivée au laboratoire, le sujet remplit et signe le formulaire de consentement. Ensuite, on lui explique l'importance de ces tests ainsi que les conditions de l'expérimentation.

Le sujet exécute quelques essais (de levage dans chaque direction) afin de trouver un rythme convenable. Enfin, on place le sujet sur la plate-forme de force à l'endroit désigné pour la position des pieds.

Lorsque l'expérimentation commence, le sujet doit exécuter la tâche répartie en quatre séries selon le plan de contrôle déjà expliqué. Ensuite, il effectue trois essais par condition; les deux essais retenus pour fins d'analyse furent ceux dont les durées d'exécution étaient le plus semblables.

Après chaque manipulation de charge, le sujet bénéficie d'un repos d'environ 2 minutes afin d'éviter la fatigue et de permettre une bonne récupération.

Les données de force numérisées pour chaque essai furent soumises à plusieurs transformations avant l'analyse statistique. En premier lieu, les trois essais réalisés par un sujet dans les mêmes conditions (technique de levage,

poids de caisse, direction de placement) furent regroupés, et les deux essais ayant les durées d'élévation les plus proches l'une de l'autre furent retenus. Ensuite les courbes de force totale ( $Z_{\text{somme}}$ ) et de force au pied droit ( $Z_1$ ) ou gauche ( $Z_2$ ) furent vincentisées, les ramenant toutes à 50 points successifs, et exprimées en newtons. De chaque courbe, fut soustrait le poids du sujet: le poids entier pour la courbe des mesures  $Z_{\text{somme}}$ , et la demie du poids pour la courbe  $Z_1$  et la courbe  $Z_2$ . La donnée désignée "force totale" fut obtenue par l'intégration numérique simple de la courbe  $Z_{\text{somme}}$ ; elle correspond à l'effort déployé par le sujet pour lever la caisse, à partir du moment où celle-ci quitte le sol jusqu'à son dépôt sur la table. D'autre part, un indice d'asymétrie des forces aux pieds fut fourni par l'intégrale de la bande intérieure formée par les courbes  $Z_1$  et  $Z_2$ , pour la même période de levage; l'indice est d'autant plus élevé que les courbes du pied droit et du pied gauche s'écartent l'une de l'autre. Des analyses de variance sur ces données, en fonction des variables contrôlées dans cette recherche, complètent les méthodes d'analyse. L'Annexe donne l'exemple d'une démarche type de traitement d'une série d'essais.

## CHAPITRE IV

### RÉSULTATS

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus grâce à l'expérimentation décrite au chapitre précédent. Dans un premier temps, les moyennes et tableaux d'analyse de variance concernant la force verticale totale et un indice d'asymétrie de force sont présentés en fonction des variables indépendantes, soit les deux techniques (genoux fléchis-dos droit et genoux droits-dos fléchi), les deux charges (caisse pleine et caisse vide) et les trois directions de placement des caisses (gauche, centre et droite). Dans un deuxième temps, nous discuterons des résultats obtenus en les confrontant aux hypothèses émises au départ. Seuls les résultats d'analyse donnant lieu à une différence significative aux seuils de 5% ou 1% seront présentés dans cette section.

Indiquons d'emblée que la durée d'élévation moyenne, à travers toutes nos données, fut de 1,637 s, avec un écart-type de 0,225 s (la variabilité intrasujet fut minime, avec un écart-type de 0,090 s). Nulle variation significative

n'est apparue pour cette variable, indiquant que l'on peut considérer que les sujets exécutèrent tous leur tâche dans un format temporel bien homogène.

### **Force verticale totale**

D'abord, considérons les données de force verticale totale obtenue par la valeur issue de la mesure du point "Zsomme", exprimées en newtons; le poids des sujets est soustrait de toutes les mesures. La variable dépendante retenue pour l'analyse est l'intégrale de cette mesure pendant la période d'élévation de la charge par le sujet. Le Tableau 3 présente un résumé de l'analyse de variance de cette variable pour les quatre sujets en fonction des techniques de levage, du poids des caisses et des directions de mouvement. Il s'agit donc d'un plan d'analyse 2 x 2 x 3 à mesures répétées.

Les forces verticales totales mesurées pour les techniques GD-DF et GF-DD sont, en moyenne, respectivement de 257,84 N et 221,63 N. Comme on le voit dans le tableau d'analyse de variance, en raison de la forte variabilité des données, la différence entre les deux moyennes n'est pas significative ( $F = 2,873$ ;  $dl = 1,3$ ; NS).

**Tableau 3**

Analyse de variance de l'intégrale de la courbe de force totale en fonction des conditions de l'expérimentation.

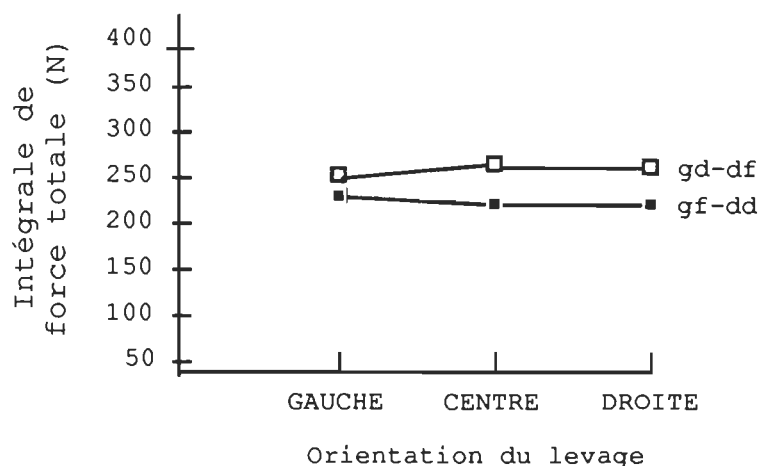
| Source de variation | Degrés de liberté | Carré moyen | F        |
|---------------------|-------------------|-------------|----------|
| Technique (A)       | 1                 | 15734,693   | 2,873    |
| A x Ss              | 3                 | 5475,940    |          |
| Caisse (B)          | 1                 | 267339,586  | 51,374** |
| B x Ss              | 3                 | 5203,755    |          |
| A x B               | 1                 | 9604,455    | 1,700    |
| A x B x Ss          | 3                 | 5648,254    |          |
| Orientation (C)     | 2                 | 11,534      | < 1      |
| C x Ss              | 6                 | 253,641     |          |
| A x C               | 2                 | 498,339     | 5,656*   |
| A x C x Ss          | 6                 | 88,101      |          |
| B x C               | 2                 | 99,939      | < 1      |
| B x C x Ss          | 6                 | 158,048     |          |
| A x B x C           | 2                 | 372,482     | 2,649    |
| A x B x C x Ss      | 6                 | 140,600     |          |

\* $p < 0,05$ .

\*\* $p < 0,01$ .

De plus, l'analyse des résultats laisse voir que le poids de la charge à soulever a une influence significative ( $F = 51,37$ ;  $df = 1,3$ ;  $p < 0,01$ ) sur le niveau de l'intégrale de force verticale totale, comme on pouvait s'y attendre. En effet, la caisse vide donne une valeur d'intégrale correspondant à 165,11 N , alors que pour la caisse pleine, cette valeur est de 314,37 N.

Concernant les techniques utilisées, l'analyse montre une interaction significative avec la direction du levage ( $F = 5,656$ ;  $df = 2,6$ ;  $p < 0,05$ ). La Figure 5 montre, pour la technique genoux droits-dos fléchi, une diminution de l'effort lorsque la charge (caisse pleine et vide) est levée à gauche, par rapport au levage effectué au centre et à droite. Par contre, au niveau de la technique genoux fléchis-dos droit, on observe un effet contraire, soit une augmentation de l'effort lorsque la charge est déposée à gauche.



**Figure 5.** Moyenne de l'intégrale de force en fonction de la direction et de la technique de levage.

### Indice d'asymétrie de l'effort

Nous avons repris les résultats issus de la plate-forme de force afin de caractériser une autre dimension du comportement de levage. L'indice d'asymétrie de l'effort est obtenu en calculant l'intégrale de la bande définie entre la ligne de force mesurée au pied gauche et celle du pied droit, pour la durée du levage, soit:

$$Y = \int_{t_1}^{t_2} |F(\text{pied gauche}) - F(\text{pied droit})| dt$$

Les données sont issues des points Z<sub>1</sub> et Z<sub>2</sub> de la plate-forme, transmises par l'interface, et la variable Y est exprimée en unités arbitraires. Cette variable a été soumise à une analyse de variance à 4 dimensions et à mesures

répétées, le plan d'analyse incluant 2 techniques, 2 poids de caisses, 3 orientations de levage et 2 phases du mouvement, pour nos quatre sujets. Les phases en question sont constituées par le premier tiers et le troisième tiers du mouvement de levage, représentant respectivement des phases de début et de fin du mouvement. Le Tableau 4, présente le résumé de cette analyse de variance.

La moyenne de l'indice obtenue pour la technique GF-DD est de 1181,24 et de 1060,06 pour la technique GD-DF. Cette petite différence apparaît non significative au Tableau 4 [ $F(1,3)=1,902$ ; ns].



**Tableau 4**

Analyse de variance de l'indice d'asymétrie de force en  
fonction des conditions de l'expérimentation et de la phase  
du mouvement

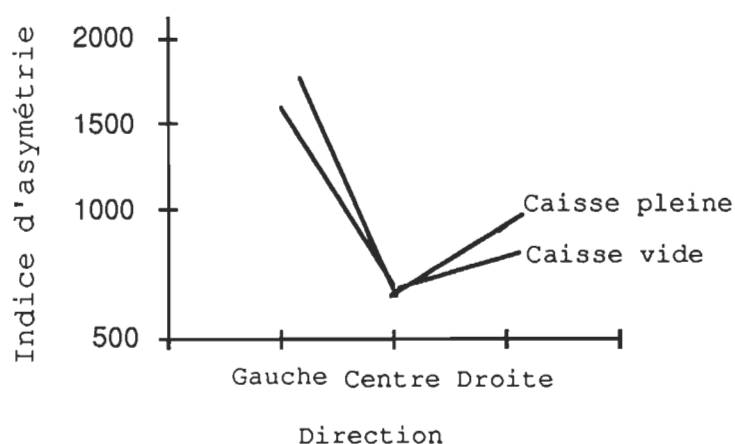
| Source de variation | Degrés de liberté | Carré moyen  | F        |
|---------------------|-------------------|--------------|----------|
| Technique (A)       | 1                 | 352473,844   | 1,902    |
| A x Ss              | 3                 | 185326,656   |          |
| Caisse (B)          | 1                 | 246862,365   | 6,196    |
| x Ss                | 3                 | 39839,731    |          |
| x B                 | 1                 | 48182,401    | 1,358    |
| x B x Ss            | 3                 | 35480,665    |          |
| Orientation (C)     | 2                 | 8242864,087  | 7,626*   |
| C x Ss              | 6                 | 1080900,653  |          |
| A x C               | 2                 | 21928,045    | < 1      |
| A x C x Ss          | 6                 | 35961,881    |          |
| B x C               | 2                 | 181097,310   | 6,143*   |
| B x C x Ss          | 6                 | 29479,717    |          |
| A x B x C           | 2                 | 76459,452    | 2,683    |
| A x B x C x Ss      | 6                 | 28498,273    |          |
| Phases (D)          | 1                 | 21374182,161 | 66,702** |
| D x Ss              | 3                 | 320443,702   |          |
| A x D               | 1                 | 69659,298    | < 1      |
| A x D x Ss          | 3                 | 92629,932    |          |
| B x D               | 1                 | 281606,003   | 5,204    |
| B x D x Ss          | 3                 | 54115,969    |          |
| A x B x D           | 1                 | 189954,509   | 3,009    |
| A x B x D x Ss      | 3                 | 63132,561    |          |
| C x D               | 2                 | 7774893,838  | 9,046*   |
| C x D x Ss          | 6                 | 859467,086   |          |
| A x C x D           | 2                 | 31880,090    | < 1      |
| A x C x D x Ss      | 6                 | 95506,749    |          |
| B x C x D           | 2                 | 58846,456    | 2,505    |
| B x C x D x Ss      | 6                 | 23488,601    |          |
| A x B x C x D       | 2                 | 20958,351    | < 1      |
| A x B x C x D x Ss  | 6                 | 21109,567    |          |

\*  $p < 0,05$ .

\*\*  $p < 0,01$ .

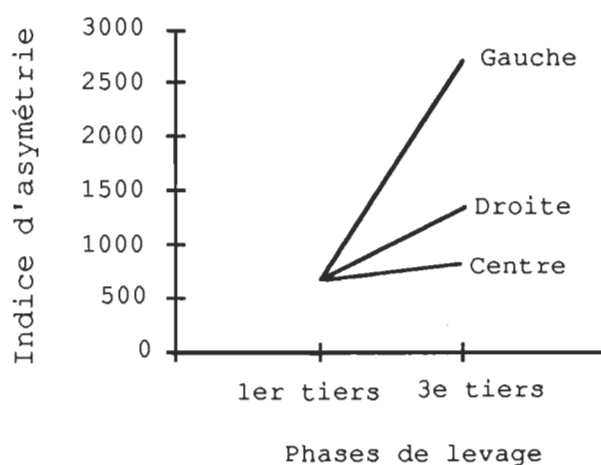
La Figure 6 montre les moyennes des indices d'asymétrie pour les trois directions de levage en fonction du poids des caisses. Comme on le voit et comme le confirme l'analyse de variance ( $F = 7,626$ ;  $dl = 2,6$ ;  $p < 0,05$ ), l'asymétrie de l'effort varie considérablement selon la direction du mouvement. Au centre, la mesure d'asymétrie est minimale, tel qu'on pouvait s'y attendre, et elle est plus forte dans les positions latérales, particulièrement à gauche.

L'inspection de la Figure 6 montre en réalité que l'effet de direction, mentionné plus haut, se manifeste de façon plus aiguë dans le cas de la caisse pleine que dans celui de la caisse vide. Cet effet d'interaction apparaît significatif ( $F = 6,143$ ;  $dl = 2,6$ ;  $p < 0,05$ ).



**Figure 6.** Moyenne des indices d'asymétrie pour les trois directions de levage en fonction du poids des caisses.

L'asymétrie de force est fortement influencée par la phase du mouvement. Comme le montrent la Figure 7 et l'analyse de variance ( $F = 66,702$ ;  $dl = 1,3$ ;  $p < 0,01$ ), l'asymétrie apparaît surtout dans le troisième tiers du mouvement, étant quasiment nulle au début.



**Figure 7.** Moyenne de l'indice d'asymétrie de la force en fonction de la direction du levage, pour le premier tiers et le troisième tiers de la période de levage.

En outre, la Figure 7 montre une interaction entre phase et direction du mouvement de levage ( $F = 9,046$ ;  $dl = 2,6$ ;  $p < 0,05$ ). L'effet de phase, relativement mince pour un mouvement central, est fortement accentué pour le mouvement à droite et encore davantage pour le mouvement à gauche, manifestant ici un jeu de forces ou d'équilibre particulier selon le côté du mouvement.

## CHAPITRE V

### Discussion

Cette étude portait sur le comportement de levage de caisses et consistait à comparer deux techniques de levage: genoux-fléchis et dos droit (GF-DD) ainsi que genoux-droits et dos fléchi (GD-DF), selon la direction du placement des caisses (gauche, centre, droite) et leurs poids (vide, pleine). Sur les trois hypothèses émises au départ, seule la deuxième se trouve confirmée: la répartition des forces verticales sous chaque pied diffère selon la direction du mouvement, tel que le montre l'indice d'asymétrie des forces que nous avons calculé. Ce résultat confirme qu'à l'asymétrie globale du mouvement (lorsque la caisse est déposée de côté), correspond aussi une asymétrie dynamique, reflet d'une compensation d'équilibre plus importante. Il est étonnant de constater que l'indice d'asymétrie apparaît beaucoup plus grand pour les mouvements à gauche plutôt qu'à droite. Les sujets, tous droitiers, compensaient davantage un équilibre sans doute plus précaire lorsque leur mouvement se faisait du côté opposé à la main dominante.

La première hypothèse, quant à elle, stipulant que la technique genoux droits-dos fléchi entraîne une pression verticale mesurée aux pieds supérieure à la technique genoux fléchis-dos droit, n'a pas été confirmée par nos résultats. La théorie appuyant cette hypothèse voulait que la technique GF-DD permette l'enregistrement de forces verticales inférieures aux pieds, allouant ainsi une distribution de pression moins grande dans les autres régions de l'organisme, i.e., une réduction des pressions au niveau de la région lombaire, entre autres. Cependant, la forte variabilité des données obtenues pourrait expliquer l'absence de résultats significatifs; de plus le nombre peu élevé de sujets a sûrement affecté les résultats de l'analyse, en minimisant la puissance statique.

Dans le contexte de la présente étude, la technique dite ergonomique (GF-DD) n'a pas présenté les avantages qu'on lui attribue généralement au plan des forces verticales exercées sous les pieds, lorsque comparée à l'autre technique GD-DF. D'ailleurs, ces résultats sont également appuyés par les travaux réalisés par Garg et Herrin (1979), qui ont démontré par des mesures biomécaniques que la technique GF-DD était loin d'être bien justifiée. En examinant l'interaction entre la force verticale déployée par les sujets lors de l'exécution des deux techniques et l'orientation du levage, il est surprenant de constater l'écart entre les deux techniques lors du levage effectué à gauche, la technique

GF-DD exigeant davantage de force verticale alors que l'autre technique (GD-DF) enregistre l'inverse. Ce résultat curieux, difficile à comprendre, pourrait rejoindre, en partie, le manque de stabilité constaté pour les mouvements effectués à gauche.

La troisième hypothèse, voulant que les techniques diffèrent en termes d'asymétrie de force sous les deux pieds, n'est pas supportée par les résultats de l'expérimentation. Seul le poids des caisses a eu un impact sur l'indice d'asymétrie avec, encore une fois, un effet particulier pour les levées effectuées à gauche. À ce sujet, les études réalisées par Konz et al. (1973) viennent confirmer les résultats en soulignant que l'augmentation du poids manipulé occasionnait un impact sur les forces de réaction mesurées aux pieds. Le problème de stabilité évoqué précédemment pour les mouvements à gauche se manifeste ici par une valeur remarquablement élevée de l'indice d'asymétrie. C'est comme si le sujet droitier, voulant déposer la caisse à sa gauche, devait exercer des pressions compensatoires du pied gauche pour maintenir un certain niveau d'équilibre.

L'inspection des courbes de force totale, dont le poids du corps était soustrait, a révélé dans plusieurs cas la présence d'une phase d'allégement. Ce phénomène apparaissait comme une chute de la courbe de force sous la ligne de base, ce entre le tiers et la demie de la période de levage. Absent chez un de nos sujets, le phénomène s'est manifesté

pour 16 des 18 conditions avec caisses vides (2 techniques x 3 latéralités x 3 sujets) alors qu'il n'est apparu que pour 3 des 18 conditions avec caisses pleines. D'ailleurs, un calcul supplémentaire montre que l'impulsion nette pour le levage de la caisse vide fut en moyenne de 51,77 N contre 27,41 N pour le levage de la caisse pleine. Nous interprétons cet ensemble d'indices dans le sens d'une différence dans la dynamique des mouvements de levage. Ainsi, il semble qu'avec la caisse vide, le mouvement de levage ait comporté une composante balistique peut-être due à un effort amorcé trop grand. Le mouvement avec caisse pleine, quant à lui, s'est effectué de façon plus continue sans à-coup, avec un effort sans doute mieux proportionné.

Il est permis de se poser une question suite aux résultats obtenus dans la présente étude. Jusqu'à quel point l'absence de différences mesurées entre les deux techniques de levage est-elle attribuable à notre faible échantillonnage ou à notre choix de paramètres évalués? Une recherche faite avec 20 ou 50 sujets, ou encore une description cinématographique et dynamographique plus complète, révéleraient peut-être des caractéristiques qui ont échappé aux moyens employés dans la présente étude.

Pour consolider et aller au-delà des présentes conclusions, les chercheurs devront considérer certains aspects que nous avons négligés dans notre étude, soit la force antéro-postérieure totale ainsi que celle exercée sous

chaque pied, et le déplacement du centre de masse du système particulièrement lors de mouvements de levage effectués vers la gauche.



## Références

- Abenhaim, L. et Suissa, S. (1987). Importance and economic burden of occupational back pain: A study of 2500 cases representative of Québec. *Journal of Occupational Medicine*, 29, 674-678.
- Anderson, C. K., Chaffin, D. B., Herrin, G. D. et Matthews, L. S. (1985). A biomechanical model of the lumbosacral joint during lifting activities. *Journal of Biomechanics*, 18, 571-584.
- Anderson, C. K., et Chaffin, D. B. (1986). A biomechanical evaluation of five lifting techniques. *Applied Ergonomics*, 17, 2-8.
- Basmajian, J. V. (1967). *Muscles alive* (2ième éd.). Baltimore: Williams & Wilkins.
- Bhattacharya, A. et Ghista, D. N. (1985). *Biomechanical guidelines for determining the limiting values of occupational task involving torsional loading of the spine* (p. 60-65). In D. A. Winters, R. W. Norman, R. P. Wells, K. C. Hayes et A. E. Patla, *Biomechanics IX-B*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Brown, J. R. (1971). *Lifting as an industrial hazard*. Toronto: Labour Safety Council of Ontario, Ontario Department of Labour.

- Bush, J. C., Schipplein, O. G., Andersson, B. J. et Andriacchi, T. P. (1988). Influence of dynamic factors on the lumbar spine moment in lifting. *Ergonomics*, 31, 211-216.
- Chaffin, D. B. (1985). The value of biomechanical assessments of problems of load handling, work place layouts, and task demands. In D. A. Winter, R. W. Norman, R. P. Wells, K. C. Hayes and A. E. Patla (Éds), *Biomechanics IX-B* (pp. 27-31). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Chaffin, D. B. et Andersson, G. B. J. (1972). *Occupational Biomechanics*. Toronto: Wiley.
- Ciriello, V. M. et Snook, S. H. (1978). The effects of size, distance, height and frequency on manual handling performance. *Proceedings of the Human Factors Society*, 22nd Annual Meeting. Detroit, Michigan.
- Ciriello, V. M. et Snook, S. H. (1983). A study of size, distance, height, and frequency effects on manual handling tasks. *Human Factors*, 25, 473-483.
- Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST). (1991). *Plein le dos et plein les bras*. Bibliothèque du Québec.

- Cook, T. M. et Newman, D. A. (1987). The effects of load placement on the EMG activity of the low back muscles during load carrying by men and women. *Ergonomics*, 30, 1413-1423.
- Damkot, D. K., Pope, M. H., Lord, J. & Frymoyer, J. W. (1984). The relationship between work history, work environment and low back pain in males. *Spine*, 9, 395-399.
- Davis, P. R. (1959). Posture of the trunk during lifting of weights. *British Medical Journal*, 1, 87-89.
- Drury, G. C., Deeb, J. M., Hartman, B., Woolley, S., Drury, C. E. et Gallagher, S. (1989) Symmetric and assymmetric manual material handling, part 2: Biomechanics. *Ergonomics*, 32, 565-583.
- Farfan, H. F., Gracovetsky, S. et Helleur, C. (1985). The role of mathematical models in the assessment of task in the workplace. In D. A. Winter, R. W. Norman, R. P. Wells, K. C. Hayes & A. E. Patla (Éds), *Biomechanics IX-B*, (pp. 38-43). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Freivalds, A., Chaffin, D. B., Garg, A. et Lee, K. S. (1984). A dynamic biomechanical evaluation of lifting maximum acceptable loads. *Journal of Biomechanics*, 17, 251-262.

- Garg A., et Badger, D. (1986). Maximum acceptable weights and maximum voluntary isometric contraction for assymmetric lifting. *Ergonomics*, 29, 879-892.
- Garg, A. et Herrin, D. G. (1979). Stoop or Squat: A Biomechanical and metabolic evaluation. *A.I.I.E. Transactions*, 11, 293-302.
- Garg, A. et Saxena, U. (1980). Container characteristics and maximum acceptable weight of lift. *Human Factors*, 22, 487-495.
- Genaidy, A. M., Asfour, S. S., Mital, A. et Tritar, M. (1988). Psychophysical capacity modeling in frequent manual materials handling activities. *Human Factors*, 30, 319-337.
- Gervais, M. et Hébert, F. (1987). *Profil statistique des lésions au dos*. Montréal: Institut de recherche en santé et en sécurité au travail du Québec.
- Gracovetsky, S., Farfan, H. F. et Lamy, C. (1977). A mathematical model of the lumbar spine using an optimized system to control muscles and ligaments. *Orthopedic Clinics of North America*, 8, 135-153.
- Grieve, D. W. (1974). Dynamic characteristics of man during crouch- and stoop-lifting. In R. C. Nelson and C. A. Morehouse (Éds), *Biomechanics IV* (pp. 19-29). Baltimore: University Park Press.

- Konz, S. A. et Goetzee, J. (1978). Prediction of ratings of lifting difficulty from individual and task variables. *Human Factors*, 29, 481-487.
- Konz, S., Dey, S. et Bennet, C. (1973). Forces and torques in lifting. *Human Factors*, 15, 237-245.
- Kroemer, K. H. E. (1992). Personnel training for safer material handling. *Ergonomics*, 35, 1119-1134.
- Leskinen, T. P. J., Stalhammar, H. R., Kuorinka, I. A. A., et Troup, J. D. G. (1983). A dynamic analysis of spinal compression with different lifting techniques. *Ergonomics*, 26, 595-604.
- MacConaill, M. A., et Basmajian, J. V. (1969). *Muscles and movements*. Baltimore: Williams et Wilkins.
- Manning, D. P., Mitchell, et Blanchfield. (1984). Body movements and events contributing to accidental and nonaccidental back injuries. *Spine*, 9, 734-739.
- Morris, J. M., Lucas, D. B. et Bresler, B. (1961). Role of the trunk in stability of the spine. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 43-A, 327-351.
- Nachemson, A. (1962). Some mechanical properties of the lumbar intervertebral discs. *Bulletin of Hospital Joint Disease*, 23, 130-143.

- Nachemson, A., et Elfstrom, G. (1970). Intervital dynamic pressure measurements in lumbar discs. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine* (Suppl. 1).
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (1981). *Work practices guide for manual lifting*. Cincinnati, OH: Division of Biomedical and Behavioral Science.
- Perkins, R. et Konz, S. (1974). Force exertion during lifting with light loads. In E. L. Saenger et M. Kirkpatrick III (Eds), *Human Factors Society 18th annual meeting*, (pp. 393-396). Huntsville: The Human Factors Society.
- Schultz, A., Andersson, G. B. J., Örtengren, R., Björk, R. et Nordin, M. (1982). Analysis and quantitative myoelectric measurements of loads on the lumbar spine when holding weights in standing postures. *Spine*, 7, 390-397.
- Smyth, G. (1992). *Optimisation du placement de caisses de produits alimentaires dans un entrepôt et prédiction des chargements lombaires lors d'activités de manutention*. Thèse de doctorat. Université de Montréal.
- Snook, S. H. (1978). The design of manual handling tasks. *Ergonomics*, 21, 963-985.

Strait, L. A., Inman, V. T., et Ralston, H. J. (1967).

Sample illustrations of physical principles selected from physiology and medicine. *American Journal of Physics*, 15, 375-382.

## **ANNEXE**

**Démarche-type, Tableaux**



## Démarche-type de traitement d'une série d'essais

Rappelons d'abord que chaque sujet effectue 4 séries de 9 combinaisons, à raison de 3 répétitions par combinaison, selon le plan expérimental.

### Étape N°1

Les données sont regroupées en tenant compte du poids de la caisse, de la direction du levage (gauche, centre et droite) et de la technique utilisée (GD-DF ou GF-DD).

Nous obtenons ainsi, pour chaque combinaison technique x caisse x direction, un ensemble de 9 essais équivalents par sujet.

Le Tableau 5 présente les données brutes telles que recueillies par le système Apple II. Ces données proviennent du sujet PP, en combinaison GD-DF, caisse vide, au centre. L'astérisque (\*) dans la colonne "Signal" indique la période pendant laquelle la caisse est supportée par le manutentionnaire. Les données  $Z_1$ ,  $Z_2$  et  $Z_{\text{somme}}$  sont exprimées en unités arbitraires.

La Figure 8 reproduit graphiquement les données du même essai.

### **Étape N°2**

Des 9 essais obtenus par combinaison par sujet, 5 furent retenus, après avoir enlevé les 2 essais à durées extrêmes minimum et les 2 essais extrêmes maximum. Les 5 essais retenus furent regroupés, vincentisés puis moyennés, le tout étant ramené à 50 points temporels, produisant ainsi une courbe moyenne (en 50 points) associée à une durée totale moyenne.

Le tableau 6 présente les données vincentisées et moyennées, correspondant à la période de support de la caisse par le manutentionnaire.

La figure 9 reproduit graphiquement les données du même essai (provenant des 5 courbes vincentisées et moyennées) pour le sujet PP, en combinaison technique GD-DF, placement de la caisse vide au centre.

### **Étape N°3**

Ensuite, pour chaque courbe, fut soustrait le poids du sujet c'est-à-dire le poids entier pour la courbe des mesures Zsomme (les courbes de force totale) et la demie du poids pour la courbe Z<sub>1</sub> (force au pied droit) ou Z<sub>2</sub> (gauche). La Figure 10 illustre les résultats pour le sujet GT en situation du placement de la caisse vide au centre par la

technique GD-DF. On peut constater une phase d'allégement, durant laquelle la courbe évolue en dessous de l'axe horizontal (c'est-à-dire en dessous de zéro). Aussi, la partie hachurée représente la bande dont l'intégration nous fournit l'indice d'asymétrie de force.

#### **Étape N°4**

La donnée appelée "force totale" fut obtenue par l'intégration numérique simple de la courbe Zsomme.

#### **Étape N°5**

Enfin, un indice d'asymétrie des forces aux pieds fut fourni par l'intégrale de la bande intérieure formée par les courbes Z<sub>1</sub> et Z<sub>2</sub> pour la même période de levage. La Figure 10 illustre ce calcul (surface hachurée).

Tableau 5. Données brutes recueillies par le système Apple II (exemple d'un essai effectué par le sujet PP, en combinaison GD-DF, caisse vide, au centre)

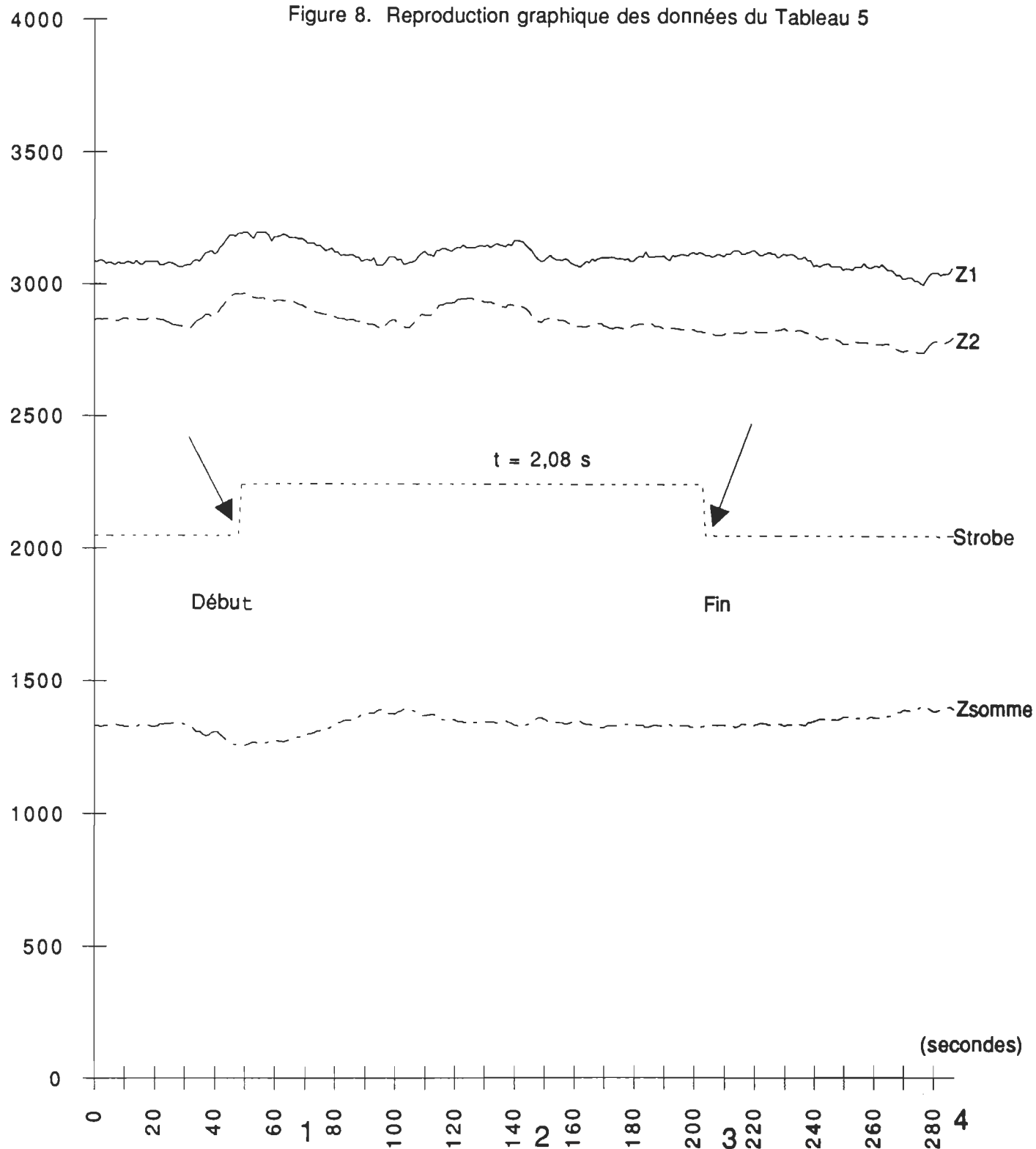
|    | Signal | Z1   | Z2   | Zsomme |
|----|--------|------|------|--------|
| 0  |        | 3085 | 2862 | 1331   |
| 1  |        | 3083 | 2866 | 1330   |
| 48 | *      | 3190 | 2962 | 1258   |
| 49 | *      | 3191 | 2961 | 1257   |
| 50 | *      | 3194 | 2965 | 1256   |
| 51 | *      | 3195 | 2955 | 1260   |
| 52 | *      | 3180 | 2953 | 1264   |
| 53 | *      | 3171 | 2948 | 1268   |
| 54 | *      | 3193 | 2945 | 1265   |
| 55 | *      | 3195 | 2945 | 1262   |
| 56 | *      | 3194 | 2947 | 1264   |
| 57 | *      | 3193 | 2942 | 1264   |
| 58 | *      | 3183 | 2940 | 1268   |
| 59 | *      | 3161 | 2940 | 1277   |
| 60 | *      | 3178 | 2934 | 1273   |
| 61 | *      | 3179 | 2939 | 1272   |
| 62 | *      | 3182 | 2939 | 1271   |
| 63 | *      | 3187 | 2935 | 1268   |
| 64 | *      | 3182 | 2936 | 1273   |
| 65 | *      | 3174 | 2937 | 1277   |
| 66 | *      | 3175 | 2933 | 1280   |
| 67 | *      | 3175 | 2928 | 1283   |
| 68 | *      | 3170 | 2922 | 1288   |
| 69 | *      | 3171 | 2918 | 1288   |
| 70 | *      | 3164 | 2913 | 1292   |
| 71 | *      | 3153 | 2908 | 1298   |
| 72 | *      | 3155 | 2899 | 1300   |
| 73 | *      | 3154 | 2897 | 1304   |
| 74 | *      | 3145 | 2891 | 1309   |
| 75 | *      | 3146 | 2890 | 1312   |
| 76 | *      | 3135 | 2886 | 1316   |
| 77 | *      | 3125 | 2887 | 1323   |
| 78 | *      | 3131 | 2884 | 1320   |
| 79 | *      | 3135 | 2884 | 1325   |
| 80 | *      | 3121 | 2875 | 1336   |
| 81 | *      | 3119 | 2870 | 1339   |
| 82 | *      | 3107 | 2871 | 1344   |
| 83 | *      | 3111 | 2868 | 1348   |
| 84 | *      | 3107 | 2863 | 1350   |

|     |   |      |      |      |
|-----|---|------|------|------|
| 85  | * | 3111 | 2864 | 1351 |
| 86  | * | 3111 | 2866 | 1350 |
| 87  | * | 3102 | 2859 | 1361 |
| 88  | * | 3101 | 2860 | 1363 |
| 89  | * | 3085 | 2859 | 1372 |
| 90  | * | 3090 | 2849 | 1374 |
| 91  | * | 3093 | 2851 | 1376 |
| 92  | * | 3087 | 2849 | 1378 |
| 93  | * | 3099 | 2847 | 1377 |
| 94  | * | 3071 | 2839 | 1385 |
| 95  | * | 3070 | 2833 | 1390 |
| 96  | * | 3070 | 2833 | 1390 |
| 97  | * | 3083 | 2846 | 1386 |
| 98  | * | 3101 | 2857 | 1376 |
| 99  | * | 3103 | 2863 | 1376 |
| 100 | * | 3103 | 2865 | 1374 |
| 101 | * | 3091 | 2856 | 1381 |
| 102 | * | 3095 | 2846 | 1384 |
| 103 | * | 3075 | 2839 | 1392 |
| 104 | * | 3077 | 2834 | 1392 |
| 105 | * | 3081 | 2837 | 1389 |
| 106 | * | 3084 | 2848 | 1388 |
| 107 | * | 3091 | 2862 | 1380 |
| 108 | * | 3107 | 2874 | 1376 |
| 109 | * | 3115 | 2887 | 1368 |
| 110 | * | 3124 | 2883 | 1368 |
| 111 | * | 3113 | 2882 | 1371 |
| 112 | * | 3110 | 2883 | 1372 |
| 113 | * | 3105 | 2894 | 1373 |
| 114 | * | 3128 | 2904 | 1361 |
| 115 | * | 3129 | 2922 | 1356 |
| 116 | * | 3135 | 2923 | 1352 |
| 117 | * | 3134 | 2927 | 1352 |
| 118 | * | 3128 | 2929 | 1354 |
| 119 | * | 3125 | 2929 | 1355 |
| 120 | * | 3134 | 2932 | 1351 |
| 121 | * | 3139 | 2943 | 1347 |
| 122 | * | 3139 | 2944 | 1345 |
| 123 | * | 3148 | 2945 | 1344 |
| 124 | * | 3139 | 2945 | 1344 |
| 125 | * | 3137 | 2948 | 1344 |
| 126 | * | 3139 | 2945 | 1342 |
| 127 | * | 3139 | 2939 | 1344 |
| 128 | * | 3145 | 2937 | 1344 |
| 129 | * | 3146 | 2937 | 1345 |
| 130 | * | 3142 | 2934 | 1345 |

|     |   |      |      |      |
|-----|---|------|------|------|
| 131 | * | 3148 | 2931 | 1344 |
| 132 | * | 3139 | 2933 | 1345 |
| 133 | * | 3147 | 2928 | 1346 |
| 134 | * | 3153 | 2925 | 1339 |
| 135 | * | 3149 | 2923 | 1344 |
| 136 | * | 3146 | 2916 | 1347 |
| 137 | * | 3143 | 2914 | 1348 |
| 138 | * | 3152 | 2924 | 1344 |
| 139 | * | 3147 | 2922 | 1340 |
| 140 | * | 3166 | 2920 | 1333 |
| 141 | * | 3167 | 2924 | 1330 |
| 142 | * | 3164 | 2919 | 1325 |
| 143 | * | 3160 | 2913 | 1325 |
| 144 | * | 3147 | 2908 | 1332 |
| 145 | * | 3135 | 2896 | 1337 |
| 146 | * | 3124 | 2877 | 1346 |
| 147 | * | 3107 | 2867 | 1352 |
| 148 | * | 3094 | 2859 | 1360 |
| 149 | * | 3087 | 2856 | 1361 |
| 150 | * | 3091 | 2867 | 1356 |
| 151 | * | 3101 | 2870 | 1348 |
| 152 | * | 3111 | 2874 | 1344 |
| 153 | * | 3100 | 2872 | 1344 |
| 154 | * | 3095 | 2867 | 1344 |
| 155 | * | 3095 | 2865 | 1341 |
| 156 | * | 3090 | 2865 | 1342 |
| 157 | * | 3097 | 2861 | 1337 |
| 158 | * | 3093 | 2854 | 1338 |
| 159 | * | 3079 | 2850 | 1342 |
| 160 | * | 3075 | 2843 | 1346 |
| 161 | * | 3071 | 2842 | 1346 |
| 162 | * | 3065 | 2844 | 1348 |
| 163 | * | 3077 | 2839 | 1340 |
| 164 | * | 3087 | 2840 | 1336 |
| 165 | * | 3084 | 2845 | 1337 |
| 166 | * | 3097 | 2846 | 1332 |
| 167 | * | 3091 | 2849 | 1332 |
| 168 | * | 3097 | 2854 | 1328 |
| 169 | * | 3102 | 2854 | 1324 |
| 170 | * | 3103 | 2846 | 1324 |
| 171 | * | 3102 | 2842 | 1329 |
| 172 | * | 3103 | 2836 | 1330 |
| 173 | * | 3105 | 2835 | 1330 |
| 174 | * | 3099 | 2840 | 1330 |
| 175 | * | 3099 | 2838 | 1332 |
| 176 | * | 3100 | 2836 | 1333 |

|     |   |      |      |      |
|-----|---|------|------|------|
| 177 | * | 3095 | 2833 | 1336 |
| 178 | * | 3100 | 2836 | 1334 |
| 179 | * | 3089 | 2840 | 1340 |
| 180 | * | 3091 | 2849 | 1336 |
| 181 | * | 3103 | 2849 | 1332 |
| 182 | * | 3108 | 2852 | 1331 |
| 183 | * | 3105 | 2850 | 1332 |
| 184 | * | 3126 | 2854 | 1323 |
| 185 | * | 3107 | 2854 | 1326 |
| 186 | * | 3105 | 2852 | 1329 |
| 187 | * | 3107 | 2844 | 1333 |
| 188 | * | 3109 | 2844 | 1330 |
| 189 | * | 3106 | 2839 | 1329 |
| 190 | * | 3110 | 2833 | 1329 |
| 191 | * | 3099 | 2834 | 1336 |
| 192 | * | 3092 | 2835 | 1335 |
| 193 | * | 3112 | 2837 | 1328 |
| 194 | * | 3108 | 2835 | 1332 |
| 195 | * | 3113 | 2833 | 1330 |
| 196 | * | 3116 | 2829 | 1330 |
| 197 | * | 3114 | 2831 | 1330 |
| 198 | * | 3110 | 2831 | 1330 |
| 199 | * | 3119 | 2832 | 1325 |
| 200 | * | 3123 | 2829 | 1326 |
| 201 | * | 3116 | 2824 | 1329 |
| 202 | * | 3123 | 2824 | 1325 |
| 203 | * | 3118 | 2821 | 1328 |
|     |   |      |      |      |
| 286 |   | 3049 | 2792 | 1398 |
| 287 |   | 3068 | 2803 | 1391 |

Figure 8. Reproduction graphique des données du Tableau 5





| Tableau 6. Données vincentisées et moyennées<br>correspondant à la période de support de la caisse par le<br>sujet PP, en combinaison technique GD-DF, caisse vide,<br>centre |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|
|   | Z1      | Z2      | Zsomme  |
| 0   | 3280,8  | 2988    | 1226,2  |
| 1   | 3278,8  | 2990,38 | 1225,5  |
| 2   | 3274,36 | 2991,06 | 1227,86 |
| 3   | 3271,12 | 2995,68 | 1228,88 |
| 4   | 3265    | 2992,88 | 1233,26 |
| 5   | 3251,16 | 2982,02 | 1245,1  |
| 6   | 3227,86 | 2958,06 | 1262,44 |
| 7   | 3204,48 | 2939,94 | 1278,46 |
| 8   | 3198,18 | 2925,62 | 1287,92 |
| 9   | 3172,38 | 2907,18 | 1305,46 |
| 10  | 3153,36 | 2885,12 | 1322,86 |
| 11  | 3134,08 | 2863,32 | 1341,98 |
| 12  | 3106,5  | 2834,86 | 1366,4  |
| 13  | 3097,48 | 2829,74 | 1374,8  |
| 14  | 3080,94 | 2819,88 | 1390,48 |
| 15  | 3093,76 | 2832,64 | 1387,58 |
| 16  | 3107,54 | 2840,16 | 1383,52 |
| 17  | 3090,16 | 2827,58 | 1395,26 |
| 18  | 3090,24 | 2832,98 | 1395,08 |
| 19  | 3097,86 | 2839,16 | 1387,76 |
| 20  | 3086,9  | 2838,54 | 1389,46 |
| 21  | 3093,78 | 2849,56 | 1381,48 |
| 22  | 3093,76 | 2853,46 | 1377,66 |
| 23  | 3097,14 | 2854,9  | 1374,78 |
| 24  | 3113,06 | 2870    | 1364,34 |
| 25  | 3124,98 | 2889,72 | 1351,96 |
| 26  | 3126,18 | 2888,42 | 1352,18 |
| 27  | 3130,54 | 2890,22 | 1348,66 |
| 28  | 3129,42 | 2889,58 | 1347,86 |
| 29  | 3133,84 | 2889,18 | 1345,16 |
| 30  | 3139,94 | 2893,9  | 1341,06 |
| 31  | 3145,04 | 2897,7  | 1337,1  |
| 32  | 3150,3  | 2899,32 | 1333,48 |
| 33  | 3154,46 | 2898,04 | 1329,6  |
| 34  | 3147,14 | 2887,78 | 1333,68 |
| 35  | 3149,72 | 2875,28 | 1333,96 |
| 36  | 3153,42 | 2871,94 | 1330,08 |
| 37  | 3164,52 | 2868,54 | 1323,76 |
| 38  | 3160,34 | 2869,48 | 1321,66 |
| 39  | 3162,46 | 2872,36 | 1319,5  |

|    |         |         |         |
|----|---------|---------|---------|
| 40 | 3155,02 | 2869,42 | 1320,38 |
| 41 | 3151,96 | 2867,66 | 1321,22 |
| 42 | 3152,86 | 2868,68 | 1318,2  |
| 43 | 3145,18 | 2861,22 | 1322,8  |
| 44 | 3130,02 | 2854,62 | 1329,48 |
| 45 | 3136,36 | 2863,94 | 1324,02 |
| 46 | 3136,3  | 2865,58 | 1322,22 |
| 47 | 3135,44 | 2865,86 | 1322,28 |
| 48 | 3140,36 | 2867,38 | 1321,06 |

Figure 9. Reproduction graphique des données du tableau 6

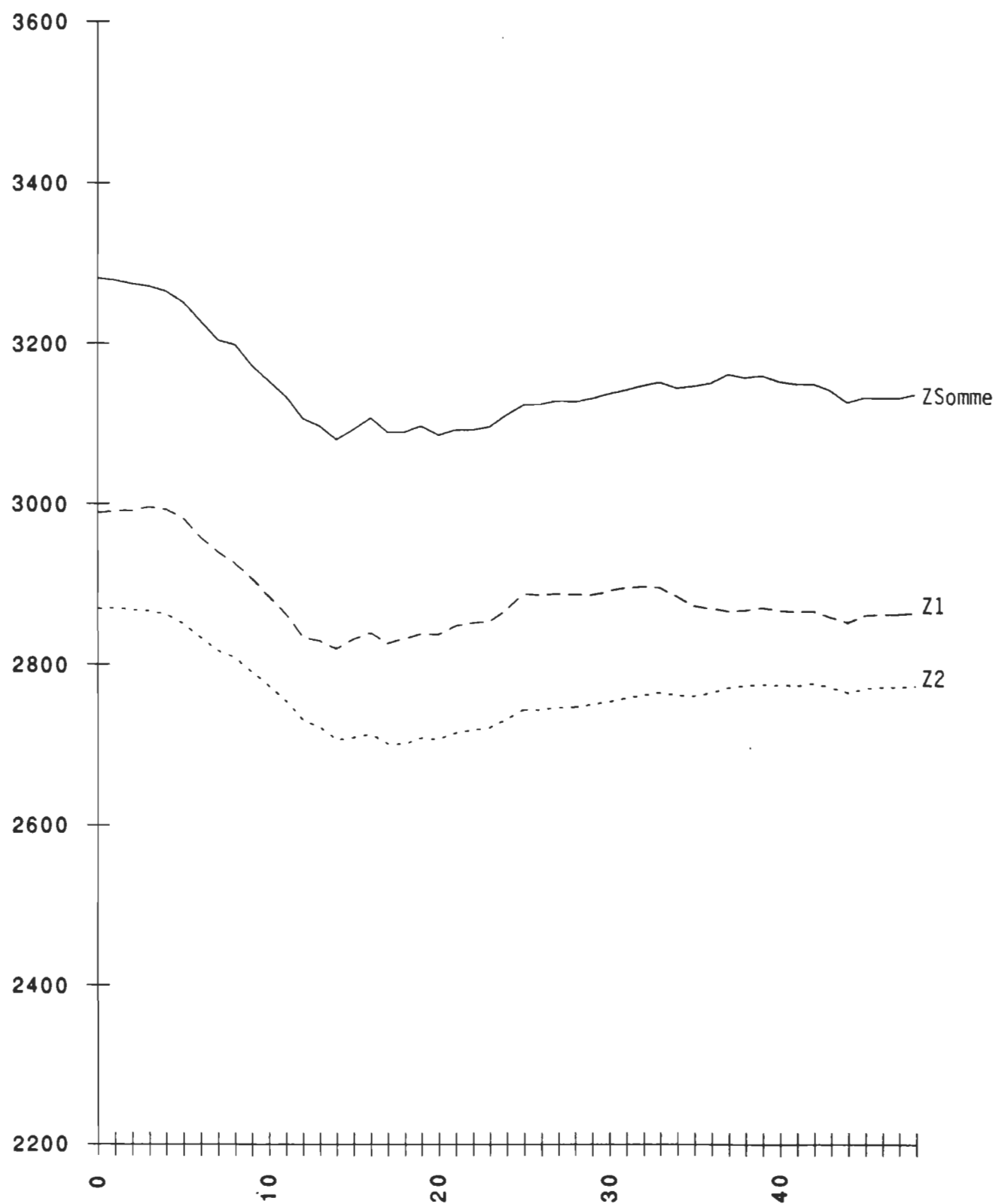


Figure 10. Sujet GT, caisse vide au centre,  
technique GD-DF

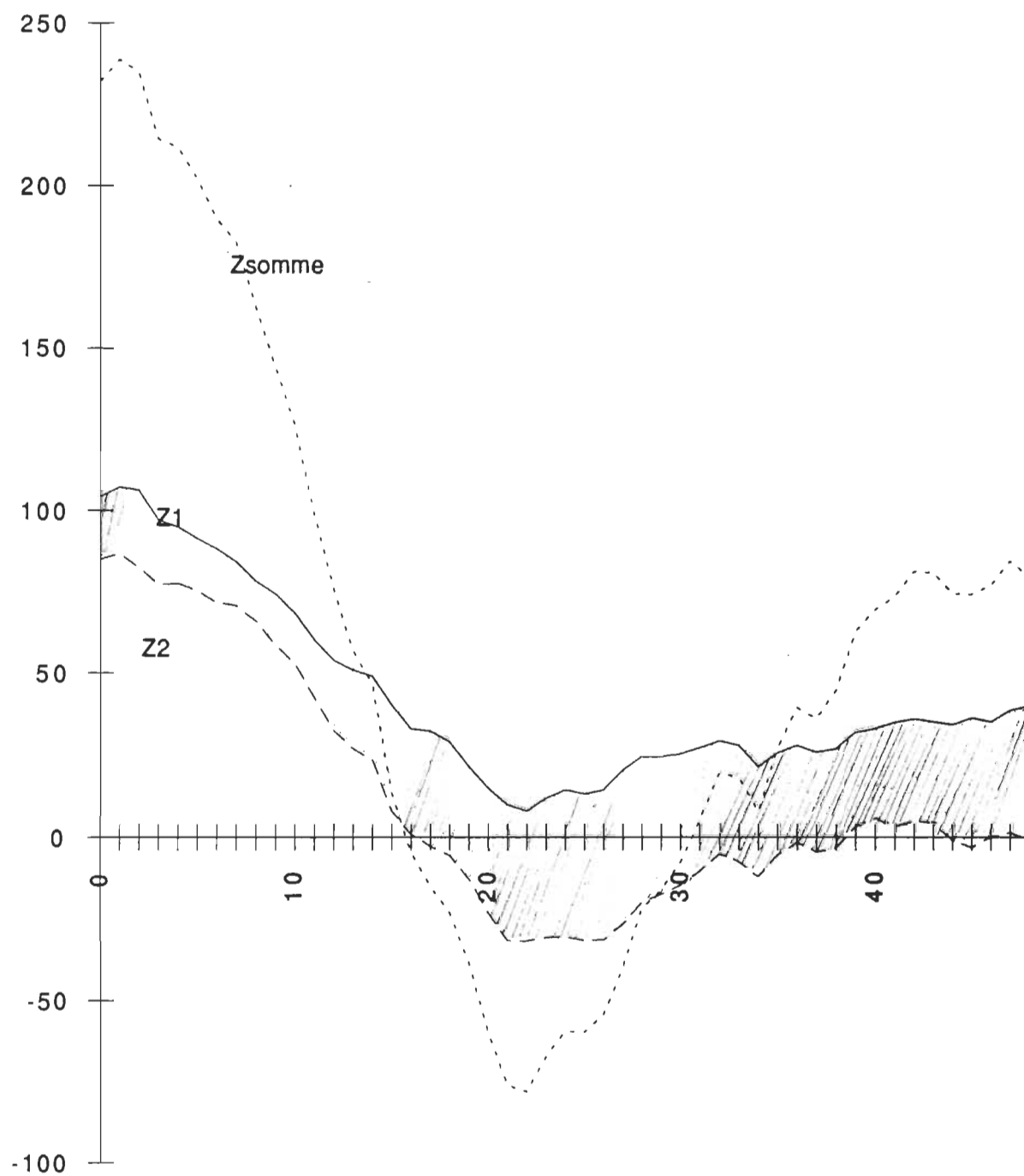


Tableau 7

Intégrale totale nette de Zsomme

|               | A <sub>1</sub> = Technique n:1 GF-DD |        |        |                                |        |        | A <sub>2</sub> = Technique n:2 GD-DF |        |        |                                |        |        |
|---------------|--------------------------------------|--------|--------|--------------------------------|--------|--------|--------------------------------------|--------|--------|--------------------------------|--------|--------|
|               | B <sub>1</sub> - caisse vide         |        |        | B <sub>2</sub> = caisse pleine |        |        | B <sub>1</sub> = caisse vide         |        |        | B <sub>2</sub> = caisse pleine |        |        |
|               | G                                    | C      | D      | G                              | C      | D      | G                                    | C      | D      | G                              | C      | D      |
| Sujet 1<br>PP | 84.78                                | 90.10  | 88.65  | 96.51                          | 105.57 | 99.59  | 89.04                                | 92.31  | 93.57  | 263.38                         | 291.21 | 273.39 |
| Sujet 2<br>GT | 36.07                                | 29.34  | 28.66  | 179.50                         | 167.60 | 169.52 | 49.79                                | 53.83  | 54.16  | 182.34                         | 175.56 | 169.52 |
| Sujet 3<br>EL | 158.29                               | 175.46 | 142.45 | 323.34                         | 292.27 | 301.70 | 171.07                               | 190.38 | 152.20 | 370.50                         | 404.52 | 404.41 |
| Sujet 4<br>MS | 370.68                               | 356.66 | 372.64 | 569.05                         | 532.83 | 547.89 | 364.87                               | 353.31 | 364.26 | 514.42                         | 539.49 | 571.96 |
| $\bar{X}$     | 162.45                               | 162.89 | 158.1  | 292.1                          | 274.57 | 279.67 | 168.69                               | 172.46 | 166.05 | 332.66                         | 352.69 | 354.82 |

**Tableau 8**

**Indice d'asymétrie des forces**

| Bandes  | A <sub>1</sub> = Technique n:1 GF-DD |         |         |                                |         |         | A <sub>2</sub> = Technique n:2 GD-DF |         |         |                                |         |         |
|---------|--------------------------------------|---------|---------|--------------------------------|---------|---------|--------------------------------------|---------|---------|--------------------------------|---------|---------|
|         | C <sub>1</sub> - caisse vide         |         |         | C <sub>2</sub> = caisse pleine |         |         | C <sub>1</sub> = caisse vide         |         |         | C <sub>2</sub> = caisse pleine |         |         |
|         | G                                    | C       | D       | G                              | C       | D       | G                                    | C       | D       | G                              | C       | D       |
| Sujet 1 | 434.19                               | 217.80  | 155.53  | 279.96                         | 283     | 306.17  | 184.05                               | 157.67  | 133.60  | 415.23                         | 241.52  | 211.11  |
| PP      | 613.50                               | 50.34   | 786.02  | 1005.53                        | 93.98   | 1121.97 | 644.41                               | 300.7   | 526.96  | 821.36                         | 155.51  | 746.16  |
|         | 1921.78                              | 212.85  | 1794.15 | 2725.04                        | 200     | 2088.91 | 1875.71                              | 99.88   | 1782.1  | 2109.49                        | 60.52   | 1698.87 |
| Sujet 2 | 351.16                               | 257.73  | 402.8   | 341.25                         | 169.97  | 168.02  | 92.26                                | 168.70  | 412.98  | 166.91                         | 197.89  | 366.79  |
| GT      | 1412.58                              | 588.62  | 598.69  | 1528.69                        | 407.22  | 639.30  | 1090.87                              | 549.03  | 436.58  | 1492.34                        | 327.43  | 889.54  |
|         | 2334.02                              | 532.71  | 1548.64 | 2278.93                        | 319.64  | 1773.34 | 1869.28                              | 415.94  | 1265.40 | 2446.86                        | 316.77  | 1763.76 |
| Sujet 3 | 1036.54                              | 1409.92 | 992.71  | 1022.28                        | 735.36  | 611.42  | 1439.05                              | 1300.25 | 1152.30 | 1316.22                        | 1196.67 | 1084.56 |
| EL      | 2100.89                              | 1824.61 | 407.68  | 2476.07                        | 1087.32 | 408.93  | 2212.30                              | 1426.38 | 521.41  | 2278.71                        | 1618.96 | 263.23  |
|         | 2919.72                              | 1663.52 | 473.54  | 3644.27                        | 1373.08 | 1050.19 | 3013.41                              | 1561.23 | 357.88  | 3519.72                        | 1696.59 | 245.33  |
| Sujet 4 | 1032.72                              | 1437.22 | 1305.14 | 1066.84                        | 985.59  | 1375.52 | 570.93                               | 518.53  | 490.33  | 930.25                         | 1026.96 | 988.79  |
| MS      | 1620.58                              | 949.23  | 404.10  | 1271.50                        | 786.95  | 654.83  | 1200.54                              | 768.91  | 510.26  | 1076.75                        | 751.88  | 804.29  |
|         | 3456.41                              | 1281.42 | 518.29  | 3660.54                        | 1163.30 | 1407.31 | 2796.61                              | 825.36  | 1203.11 | 2852.57                        | 970.03  | 1374.71 |