

Titre: Évaluation ergonomique de prototypes d'outils de levage de couvercles d'égouts et d'aqueduc
Title: couvracles d'égouts et d'aqueduc

Auteur: Roxane Lardeau
Author:

Date: 2005

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Lardeau, R. (2005). Évaluation ergonomique de prototypes d'outils de levage de couvercles d'égouts et d'aqueduc [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7404/>
Citation:

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7404/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Daniel Imbeau
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**ÉVALUATION ERGONOMIQUE DE PROTOTYPES D'OUTILS DE
LEVAGE DE COUVERCLES D'ÉGOUTS ET D'AQUEDUC**

**ROXANE LARDEAU
DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES
ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)**

FÉVRIER 2005

© Roxane Lardeau, 2005.



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*

ISBN: 0-494-01349-4

Our file *Notre référence*

ISBN: 0-494-01349-4

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :
**ÉVALUATION ERGONOMIQUE DE PROTOTYPES D'OUTILS DE
LEVAGE DE COUVERCLES D'ÉGOUTS ET D'AQUEDUC**

présenté par : **Roxane Lardeau**

en vue de l'obtention du diplôme de :

Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. ROBERT, Jean-Marc, Doctorat, président

M. IMBEAU, Daniel, ing., Ph.D., membre et directeur de recherche

M. DELISLE, Alain, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Ma reconnaissance va en tout premier lieu à mon directeur de recherche, le professeur Daniel Imbeau, pour m'avoir proposé un projet à la fois concret et stimulant. Sa curiosité intellectuelle et son sens de la rigueur ont apporté une dimension inestimable à ma réflexion.

Je remercie également Bruno Farbos, associé de recherche à l'École Polytechnique, pour sa participation à ce projet. Sa créativité et sa disponibilité ont été essentielles, autant lors des essais sur le terrain que lors de la rédaction de ce mémoire.

Même s'ils n'auront sans doute pas l'occasion de lire ce mémoire, je tiens à souligner la précieuse collaboration des opérateurs (égoutiers, jointeurs, ouvriers, etc.) qui se sont prêtés de bonne volonté à des essais parfois fastidieux, mais combien nécessaires.

Aussi, la réalisation de ce projet a été rendue possible grâce à l'appui financier de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité au travail (IRSST) et de la Ville de Montréal.

Enfin, je tiens à remercier mes parents, ma famille et mes amis pour leur présence et leur soutien inconditionnel.

RÉSUMÉ

L'accès au lieu de travail des opérateurs chargés de l'entretien de réseaux souterrains dépend de l'ouverture sécuritaire d'un puits d'accès dont le couvercle pèse généralement plus de 100 kg. Cette tâche de manipulation implique des efforts physiques importants et a été identifiée par plusieurs auteurs, dont l'Institut de recherche en santé et sécurité du travail du Québec, comme un facteur de risque d'apparition de troubles musculo-squelettiques (TMS). Un des éléments contribuant également aux risques de TMS, notamment aux membres supérieurs, est l'absence d'outils réellement adaptés aux conditions de travail des opérateurs en question.

Dans le but de remédier à cette situation, l'objectif de ce projet de recherche consiste, sur le plan pratique, à participer à la conception et procéder à l'évaluation de plusieurs générations de prototypes d'un même outil conçu spécialement pour l'ouverture et la fermeture de couvercles de puits d'aqueduc et d'égouts. Sur le plan scientifique, l'objectif est de démontrer l'intérêt d'une approche ergonomique lors du développement d'un outil. Pour réaliser ces deux objectifs, le projet a été réalisé en partenariat avec un fabricant de matériel de voirie et un futur utilisateur, la Ville de Montréal.

La démarche retenue s'est divisée en deux phases principales. D'abord, une phase préliminaire visait à accompagner le fabricant dans les étapes initiales de conception. Une fois le prototype jugé fonctionnel, une phase d'observations sur le terrain a pu commencer, au cours de laquelle quatre prototypes ont été produits puis comparés à deux autres outils existants, soit le protol, l'outil actuellement utilisé par les employés municipaux de la Ville de Montréal, et l'outil fabriqué par Hydro-Québec pour ses jointeurs. Ceci a permis l'observation de plus de 150 ouvertures et fermetures au cours de la période de décembre 2003 à octobre 2004. Les opérateurs étaient interrogés à

l'aide de deux questionnaires, les essais étaient filmés et faisaient ensuite l'objet d'analyses de temps, de fréquences, d'incidents et de posture.

Les résultats ont montré que d'un point de vue biomécanique, l'utilisation du quatrième prototype procure une réduction significative de la force de compression lombaire résultante, par rapport aux autres outils évalués. Cet outil offre également un plus grand avantage mécanique à l'opérateur, la possibilité d'une économie de mouvements lors du tirage du couvercle et une meilleure adaptation à certains types de grilles. La force musculaire maximale requise lors du levage des couvercles est également réduite avec le prototype 4, même s'il n'est pas possible d'affirmer que son utilisation diminuera tous les risques liés à la manipulation de couvercles. Enfin, l'application des recommandations formulées dans ce mémoire permettra la conception de la dernière génération du prototype, conformément à des principes d'ergonomie. La prochaine étape sera alors de procéder à la validation de la version finale de l'outil sur le terrain.

En conclusion, cette étude a permis d'arriver, par un processus d'itérations, à un outil mieux conçu d'un point de vue sécurité et utilisabilité. Cette recherche apporte ainsi une contribution concrète à l'amélioration de la santé et de la sécurité des opérateurs qui manipulent des couvercles de puits d'aqueduc et d'égouts.

ABSTRACT

For any maintenance or service worker needing to enter an underground vault, the removal of a utility cover, weighing 100 kg or more, is an unavoidable step. This manual handling task requires considerable physical exertion and has been identified as a risk factor for the development of work-related musculoskeletal diseases (MSD's). An equally contributing element to the risk of MSD's is the absence of tools that are properly adapted to the working conditions of these operators.

As a practical answer to this situation, this study's purpose is to take part in the design and evaluate a number of generations of a tool prototype designed specifically for the opening and closing of sewage and aqueduct covers. On a scientific level, the study aims at demonstrating the benefits of using an ergonomic approach while developing a tool. In order to reach both these goals, the project was conducted in partnership with a public utility products manufacturer and a future end-user, the City of Montreal.

The methodology was split in two phases. First, a preliminary phase was carried out to accompany the manufacturer in the early design steps. Once the prototype was considered functional, a field-observation phase was initiated, in which a total of four prototypes were manufactured and compared to two other existing tools: the protol (or fulcrum bar), currently used by the municipal employees of the City of Montreal, and the tool provided by Hydro-Quebec to its joint technicians. This allowed the observation of more than 150 openings and closings of utility covers from December 2003 and October 2004. The workers were interviewed with the help of two questionnaires, the tests were videotaped and were later submitted to time, frequency, incident and posture analysis.

Results showed that from a biomechanical point of view, the fourth prototype allows a significant reduction of low-back compressive resulting forces, compared to the other tools. It also provides the operator with a greater lever system which reduces overall required strength, saves on the number of movements necessary to remove a cover and adapts more fittingly to certain types of grates. The peak muscular strength required for the lifting of covers is also reduced with prototype 4, although it is not possible to assert that its use will diminish all risks related to utility cover handling. Finally, this report draws recommendations that will enable the design of the last prototype, in agreement with general ergonomic principles. The next step will be to validate the last version of the tool in the field.

To conclude, this research project followed an iterative design process, allowing to produce a tool providing better safety and usability. Thus, this study brings a concrete contribution to the improvement of the health and safety of operators who handle sewage and aqueduct covers.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xv
LISTE DES ANNEXES	xvi
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 : MÉTHODOLOGIE	8
2.1 Mesures	8
2.2 Protocole d'observation	11
2.3 Prototype 1	12
2.3.1 Sites d'observations	13
2.3.2 Sujets	13
2.3.3 Protocole et mesures	14
2.3.4 Passage au prototype 2	14
2.4 Prototype 2	14
2.4.1 Sites d'observations	15
2.4.2 Sujets	15
2.4.3 Protocole et mesures	16
2.4.4 Incident concernant le prototype 2	16
2.4.5 Passage au prototype 3	16

2.5	Prototype 3	16
2.5.1	Sites d'observations	17
2.5.2	Sujets	17
2.5.3	Ajout de deux outils aux observations	18
2.5.4	Protocole et mesures	19
2.5.5	Passage au prototype 4.....	19
2.6	Prototype 4	20
2.6.1	Sites d'observations	20
2.6.2	Sujets	21
2.6.3	Protocole et mesures	21
2.7	Traitement des données	21
2.7.1	Bases de données.....	21
2.7.2	Analyses vidéos.....	22
2.7.3	Analyses de contraintes biomécaniques.....	23
2.7.4	Résumé des observations	23
CHAPITRE 3 :	RÉSULTATS	25
3.1	Résultats des essais avec le prototype 1	25
3.2	Agrégation des résultats des prototypes 2 et 3	26
3.3	Sujets	27
3.4	Résultats du questionnaire 1	27
3.4.1	Caractéristiques des couvercles.....	27
3.4.2	Caractéristiques de l'environnement.....	29
3.4.3	Effort perçu (échelle de Borg).....	29
3.4.4	Effet du bras de levier sur l'effort perçu	31
3.4.5	Niveau d'adaptation de l'outil.....	33
3.5	Résultats des analyses vidéo	35
3.5.1	Durée des étapes.....	35

3.5.2	Incidents	40
3.5.3	Analyse biomécanique des postures	44
3.5.4	Autres observations	51
3.6	Résultats du questionnaire 2	52
3.6.1	Score de l'outil quant aux 13 qualités recherchées	52
3.6.2	Les 3 qualités les plus importantes	56
3.6.3	Commentaires généraux des opérateurs	58
CHAPITRE 4 : DISCUSSION		60
4.1	Prototype 1	60
4.2	Prototype 2	61
4.3	Prototype 3	61
4.4	Protol	65
4.5	Outil HQ	68
4.6	Élaboration du prototype 4	70
4.6.1	Mors	70
4.6.2	Manche	71
4.6.3	Système de sangle à cliquet	72
4.6.4	Crochet	73
4.7	Prototype 4	74
4.8	Recommandations	75
4.9	Amélioration par rapport à l'existant	76
4.10	Contribution et limites de l'étude	77
CHAPITRE 5 : CONCLUSION		80
RÉFÉRENCES		81
ANNEXES		85

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Questionnaire 1 (partie couvercle)	9
Tableau 2.2 : Questionnaire 1 (partie environnement).....	9
Tableau 2.3 : Questionnaire 2	10
Tableau 2.4 : Résumé des mesures réalisées pendant les observations sur le terrain	24
Tableau 3.1 : Commentaires des opérateurs sur le prototype 1	26
Tableau 3.2 : Nombre d’essais, par type de couvercle et par outil	28
Tableau 3.3 : Moyenne de l’effort perçu sur l’échelle de Borg pour le prototype 3	29
Tableau 3.4 : Moyenne de l’effort perçu sur l’échelle de Borg pour le protol	30
Tableau 3.5 : Moyenne de l’effort perçu sur l’échelle de Borg pour l’outil HQ	30
Tableau 3.6 : Moyenne de l’effort perçu sur l’échelle de Borg pour le prototype 4	30
Tableau 3.7 : Ratio du bras de levier, selon l’outil	32
Tableau 3.8 : Proportion d’essais où le prototype 3 a été jugé adapté au couvercle.....	33
Tableau 3.9 : Proportion d’essais où le protol a été jugé adapté au couvercle	33
Tableau 3.10 : Proportion d’essais où l’outil HQ a été jugé adapté au couvercle	34
Tableau 3.11 : Proportion d’essais où le prototype 4 a été jugé adapté au couvercle.....	34
Tableau 3.12 : Durée moyenne des étapes d’ouverture d’un tampon, selon l’outil.....	36
Tableau 3.13 : Durée moyenne des étapes de fermeture d’un tampon, selon l’outil	37
Tableau 3.14 : Durée moyenne des étapes d’ouverture d’une grille, selon l’outil.....	39
Tableau 3.15 : Durée moyenne des étapes de fermeture d’une grille, selon l’outil.....	39
Tableau 3.16 : Nombre moyen d’incidents par essai pour les tampons, selon l’outil.....	41
Tableau 3.17 : Nombre moyen d’incidents par essai pour les grilles, selon l’outil	43
Tableau 3.18 : Analyse biomécanique de la figure 3.3 (protol, ouverture à 1 bras)	47
Tableau 3.19 : Analyse biomécanique de la figure 3.4 (protol, ouverture à 2 bras)	48
Tableau 3.20 : Analyse biomécanique de la figure 3.5 (prototype 3)	49
Tableau 3.21 : Analyse biomécanique de la figure 3.6 (outil HQ)	50

Tableau 3.22 : Analyse biomécanique de la figure 3.7 (prototype 4).....	51
Tableau 3.23 : Proportion d'opérateurs s'affirmant d'accord avec les 13 qualités.....	53
Tableau 3.24 : Ordre d'importance des 13 qualités et importance relative pondérée.....	57
Tableau 3.25 : Commentaires des opérateurs sur le prototype 3	58
Tableau 3.26 : Commentaires des opérateurs sur le protol	59
Tableau 3.27 : Commentaires des opérateurs sur l'outil HQ.....	59
Tableau 3.28 : Commentaires des opérateurs sur le prototype 4	59
Tableau 4.1 : Avantages et inconvénients des différents mors	70
Tableau 4.2 : Avantages et inconvénients des différents manches	71
Tableau 4.3 : Avantages et inconvénients des différents systèmes de sangle à cliquet ...	72
Tableau 4.4 : Avantages et inconvénients des différents crochets.....	73
Tableau 4.5 : Améliorations apportées aux outils existants par le prototype 4.....	76

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Ouverture d'un couvercle à l'aide d'un crochet	2
Figure 1.3 : Tampons (a) à 2 trous d'ancrage, (b) à 8 trous d'ancrage et (c) à pattes guides et 4 trous d'ancrage	4
Figure 1.4 : Ouverture d'un tampon sans pattes à l'aide du protol	5
Figure 2.1 : Schéma du protocole d'observation	12
Figure 2.2 : Prototype 1 : (a) de face, (b) de profil et (c) mors	13
Figure 2.3 : Prototype 2 : (a) de profil, (b) points de sortie de la sangle et (c) mors	15
Figure 2.4 : Prototype 3 : (a) de face, (b) de profil, (c) de profil et (d) mors.....	17
Figure 2.5 : Protol : (a) de face, (b) de profil, (c) de profil et (d) mors	18
Figure 2.6 : Outil Hydro-Québec : (a) de profil, (b) sangle à cliquet et (c) crochet	19
Figure 2.7 : Prototype 4 : (a) de face, (b) de profil, (c) bouton, (d) sangle et (e) mors....	20
Figure 3.1 : Effet du bras de levier sur l'effort perçu (échelle de Borg).....	32
Figure 3.2 : Protol : équilibre des forces statiques au moment du décollement.....	45
Figure 3.3 : Ouverture à un bras avec le protol.....	46
Figure 3.4 : Ouverture à deux bras avec le protol	47
Figure 3.5 : Ouverture avec le prototype 3	49
Figure 3.6 : Ouverture avec l'outil HQ.....	50
Figure 3.7 : Ouverture avec le prototype 4	51
Figure 3.8 : Prototype 4 : (a) installation du crochet et (b) position du pied	52
Figure 4.1 : Composante verticale de la force (F_y) avec le prototype 3 en S3 et S1	62
Figure 4.2 : Longueur du bras de levier (flèche) du prototype 3 en S3 et en S1	63

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Outil HQ : outil de levage de couvercle fabriqué par Hydro-Québec

TMS : troubles musculo-squelettiques

Types de couvercles :

GRH : grille circulaire à rainures horizontales

GRO : grille circulaire à rainures obliques

TAP : tampon circulaire à pattes guides

TSP : tampon circulaire sans pattes guides

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Effort perçu (échelle de borg).....	86
Annexe 2 : Installation du crochet avec les prototypes 1, 2 et 3.....	87
Annexe 3 : Incidents survenus avec le prototype 3.....	88
Annexe 4 : Calcul des forces en équilibre avec le protol.....	89

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Les opérateurs chargés de l'entretien des réseaux souterrains doivent régulièrement ouvrir et fermer des couvercles de regards, par exemple pour accéder au système d'aqueduc et d'égouts, aux postes de transformation électrique ou aux lignes de télécommunications. L'accès au lieu de travail de ces opérateurs dépend donc de l'ouverture sécuritaire et efficace d'un puits d'accès dont le couvercle pèse souvent plus de 100 kg. Ainsi, cette tâche de manipulation peut impliquer des efforts physiques importants, particulièrement pour le dos et les membres supérieurs. Aux États-Unis, la tâche d'enlèvement de couvercles de puits d'accès a été identifiée comme étant un facteur de risque d'accidents graves au dos dans les compagnies de télécommunications (ITSC, 2001 in Chang, 2003). Une étude épidémiologique européenne a même trouvé un taux de prévalence de douleurs au niveau lombaire de 73% chez les égoutiers, au cours d'une période de douze mois (Friedrich, 2000).

Au Québec, l'étude de Imbeau et coll. (2003) a recensé les outils employés par les égoutiers et ouvriers d'aqueduc pour le levage de couvercles dans trois municipalités et une entreprise privée. Les observations effectuées sur le terrain ont montré, d'une part, que la majorité des outils avaient été conçus pour un autre usage et n'étaient pas réellement adaptés à la tâche et que, d'autre part, le design des couvercles n'était pas standardisé, exigeant un outil de levage très versatile ou, à défaut, plusieurs outils.

Cette étude fait donc suite à celle d'Imbeau et coll. (2003) et se propose d'évaluer plusieurs générations de prototypes d'un même outil conçu spécialement pour l'ouverture et la fermeture de couvercles de puits d'aqueduc et d'égouts.

Il est important de situer cette étude dans son contexte théorique. Rappelons d'abord que le travail en réseau souterrain concerne plusieurs catégories professionnelles; telles, bien sûr, les égoutiers, mais aussi les ouvriers des eaux, les installateurs de câbles d'électricité et de télécommunications, les distributeurs d'air comprimé, etc. Ces opérateurs doivent en général y accéder pour des tâches d'entretien, d'inspection ou de remplacement d'équipement. Allard-Lormier et coll. (1995) ont décrit les nombreux et divers risques liés au travail en égout, tels :

- Risques d'accidents (ex. chute, noyade, électrisation, morsure d'animal);
- Risques physiques (ex. humidité, faible luminosité, bruit);
- Risques chimiques (ex. présence de gaz de fermentation);
- Risques infectieux et parasitaires, etc.

De plus, ces mêmes auteurs soulignent aussi les risques particuliers liés à la manutention des plaques d'égout, entre autres à cause de leur poids excessif et de l'absence d'un modèle unique.

De façon plus précise, Doit et Aptel (1993) se sont intéressés à la tâche de levage de plaques d'égout avec deux types de crochets et en ont estimé la contrainte lombaire correspondante. La figure 1.1 illustre une ouverture effectuée à l'aide d'un crochet simple.



Source : Washington State Department of Labor and Industries (2002)

Figure 1.1 : Ouverture d'un couvercle à l'aide d'un crochet

Les résultats de ces auteurs ont montré que le décollement de la plaque hors de son cadre constituait l'étape la plus critique d'un point de vue biomécanique, avec une force de compression maximale en L₅/S₁ dépassant souvent la valeur seuil de 3,4 kN établie par le NIOSH (1981). De plus, selon eux, l'effort initial de décollement d'une plaque encrassée, c'est-à-dire non nettoyée parce que fermée depuis longtemps, peut dépasser de 50% l'effort nécessaire au soulèvement d'une plaque nettoyée. Les auteurs en viennent à la conclusion que le lever de plaques est un facteur de risques de lombalgies à long terme, dont les principales causes sont l'intensité de l'effort déployé et la posture adoptée, souvent contraignante, dite dos-fléchi.

Or, si l'adoption d'une posture dos droit minimise la contrainte lombaire, toute flexion du dos a l'effet contraire et augmente cette contrainte (NIOSH, 1981). Deux facteurs de risques d'apparition de troubles musculo-squelettiques (TMS) sont donc réunis ici : une position en flexion prononcée associée au soulèvement d'une charge lourde.

Afin de déterminer la prévalence des TMS des membres supérieurs chez les égoutiers, Friedrich et coll. (2000) ont mené une enquête épidémiologique auprès de 255 individus. Cette étude, en plus de révéler un taux de prévalence élevé de TMS (respectivement 52%, 55% et 73% au cou, haut du dos et bas du dos), a rapporté que 90% des répondants déclaraient passer 25% de leur temps de travail en position dos-fléchi avec les mains sous le niveau des genoux.

Afin d'améliorer les difficiles conditions de travail des égoutiers, certains ont proposé une assistance mécanique à la tâche de levage du couvercle (Davis et Neeley, 1995), par exemple avec un bras hydraulique. Toutefois, malgré leur mérite, ces solutions ne correspondent pas toujours aux contraintes de temps et d'espace prévalant dans certaines situations, rendant nécessaire l'usage d'un outil manuel simple.

Dans le même ordre d'idées, d'autres auteurs ont proposé de réduire le poids des couvercles en ayant recours à des matériaux composites plutôt qu'à de l'acier¹ (Mital et Motorwala, 1995). Toutefois, le coût élevé de ceux-ci en fait une solution peu réaliste. De plus, le poids élevé des couvercles a un impact positif sur la sécurité du public, car il permet de limiter l'accès aux installations souterraines (Scherzinger, 1994), en plus d'éviter le soulèvement des plaques par effet de succion lors du passage de véhicules.

C'est à la lumière de ces informations que l'étude de Imbeau et coll. (2003), mentionnée plus tôt, s'est proposé de répertorier les outils de levage existants afin d'évaluer leur sécurité d'utilisation, ainsi que les différents types de couvercles, dont certains sont illustrés aux figures 1.2 et 1.3 (consulter cette étude pour une description exhaustive).



Figure 1.2 : Grilles (a) à rainures horizontales et (b) à rainures obliques

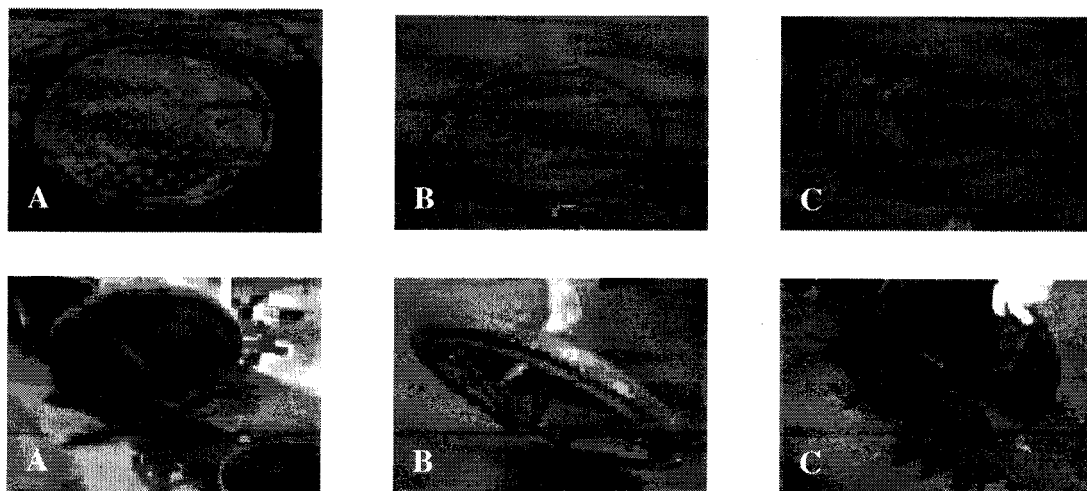


Figure 1.3 : Tampons (a) à 2 trous d'ancrage, (b) à 8 trous d'ancrage et (c) à pattes guides et 4 trous d'ancrage

¹ Par exemple, le poids d'un couvercle de diamètre 91 cm peut ainsi passer de 80 kg à 38 kg.

Des outils comme le pic, le crochet simple et le crochet double se sont révélés mal adaptés à la tâche et aux conditions de travail variées des opérateurs. De plus, pour certaines combinaisons couvercle-outil, une proportion non négligeable de travailleurs industriels en santé n'a pas la capacité musculaire requise pour réaliser la manutention et cette situation rend prévisible l'apparition de troubles musculo-squelettiques. Un outil, le protol (voir figure 1.4), est toutefois ressorti comme étant moins exigeant pour le dos et les membres supérieurs, pour deux raisons : d'abord, le couvercle n'est jamais soulevé directement par l'individu (effort vertical); ensuite, il permet de conserver une posture dos-droit lors de l'effort. Mais malgré ces avantages, il a été observé que le tirage d'un couvercle avec le protol requérait un nombre élevé de répétitions et les opérateurs le jugeaient moins bien adapté pour les grilles circulaires (par opposition aux tampons) et, enfin, il n'était pas utilisé pour refermer des grilles de forme carrée ou rectangulaire, ni pour les tampons dotés de « pattes guides »². Toujours dans cette étude, les auteurs proposaient des repères de conception pour un futur outil de levage; dans le cas d'absence de dispositif d'aide à la manutention, ils suggéraient d'exploiter le principe du protol.



Figure 1.4 : Ouverture d'un tampon sans pattes à l'aide du protol

² Les tampons à pattes (TAP) ont l'avantage de ne pas se déplacer horizontalement, hors de leur cadre; toutefois leur manipulation est plus exigeante, car il faut les soulever à la verticale (Imbeau et coll., 2003).

L'intérêt du protol est d'ailleurs confirmé par l'étude de Chang et coll. (2003), dans laquelle le design de trois outils ont été comparés en termes de force de compression en L_5/S_1 et de force requise au niveau des bras. Pour le soulèvement d'un couvercle de 104 kg, ces auteurs trouvent que le protol induit une force maximale de compression lombaire de 2,3 kN en moyenne, étant ainsi le seul outil situé sous la valeur seuil de 3,4 kN du NIOSH (1981). À titre de comparaison, elle se situe à 6,1 kN pour le crochet. Quant à la force exercée par les bras avec le protol, elle équivaut à reprendre 45% du poids du couvercle, alors qu'elle est de 80% avec le crochet. Cette étude suggérait aussi que le protol possédait le design le plus approprié d'un point de vue biomécanique.

L'état des connaissances concernant la tâche de levage de couvercles nous a permis de partir du principe que le futur outil devait permettre une posture de type « dos-droit » lors de l'effort principal. De plus, l'identification des qualités recherchées pour ce type d'outil, tel que rapportées par Derfoul (2001), nous offrait des repères utiles à la conception. Dans un premier temps, il a été jugé opportun de s'intéresser aux types de couvercles les plus répandus, soit les tampons et grilles circulaires. Les tampons à pattes ont donc été exclus de la présente étude étant donné que le principe du protol ne permet pas de soulever verticalement un couvercle muni de pattes longues.

L'objectif de cette activité de recherche consistait donc, sur le plan pratique, à arriver par itération à un outil permettant aux égoutiers de réaliser leurs tâches de façon plus sécuritaire. Sur le plan scientifique, l'objectif était de démontrer l'intérêt de recourir à une approche ergonomique pour développer un outil, en impliquant les utilisateurs dès la conception. Pour ce faire, l'étude a été réalisée en collaboration avec la Ville de Montréal, qui a fourni le terrain ainsi que les employés, et le fabricant de matériel de voirie Innova qui a produit les prototypes.

Ce mémoire est composé des chapitres suivants : la méthodologie, les résultats, la discussion et la conclusion. La méthodologie expose la démarche de réalisation des

prototypes, le protocole d'observation et de mesure sur le terrain ainsi que la façon dont ont été traitées les données recueillies. Le chapitre des résultats comporte une première section présentant les données obtenues à l'aide de questionnaires, tandis qu'une deuxième concerne tous les résultats tirés des analyses vidéo. Dans la discussion, les résultats sont synthétisés, les forces et faiblesses de l'étude sont abordées et des recommandations sont formulées pour la fabrication d'un outil répondant aux objectifs de sécurité. Enfin, la conclusion fait ressortir les principaux aboutissements de l'étude et ses retombées.

CHAPITRE 2 : MÉTHODOLOGIE

La démarche retenue pour l'évaluation des prototypes dans cette étude s'est divisée en deux phases : une phase préliminaire et une phase d'observations sur le terrain.

La phase préliminaire visait à accompagner le fabricant dans les étapes initiales de conception du futur prototype et a duré trois mois. L'objectif était de vérifier le principe de fonctionnement de l'outil auprès d'opérateurs de la Ville de Montréal avant de débiter les observations sur le terrain. Trois rencontres ont eu lieu les 10 septembre, 25 novembre et 9 décembre 2003 pour tester les pré-prototypes. Ces tests étaient immédiatement suivis de réunions de travail afin d'améliorer et raffiner le design et le principe de fonctionnement de l'outil.

Une fois le prototype jugé fonctionnel, la phase d'observations sur le terrain a pu commencer avec la livraison du prototype 1. Au total, quatre prototypes ont été produits et testés au cours de la période du 15 décembre 2003 au 14 octobre 2004.

2.1 Mesures

Les mesures réalisées lors des observations sur le terrain suivent de près celles de l'étude de Imbeau et coll. (2003), à la différence que seul l'effort physique perçu suite à l'effort (et non prévu) était évalué. Avant chaque essai (un essai consistant en une ouverture suivie d'une fermeture), les caractéristiques du couvercle et de l'environnement étaient notées grâce au questionnaire 1, tel que présenté aux tableaux 2.1 et 2.2.

Tableau 2.1 : Questionnaire 1 (partie couvercle)

Caractéristiques du couvercle	Choix de réponses
Type	grille / tampon
Forme	circulaire / rectangulaire / carrée / ovale
Forme dessous	plat / arrondi / conique
Emboîtement	oui / non
Trous ancrage	nombre
Encoches	nombre
Diamètre	cm
Poids	kg
Pattes	oui / non
Si présence de pattes	nombre
Si présence de pattes	longueur (cm)
Modèle du couvercle	marque et numéro de série
Endroit	arrondissement et adresse civique

Tableau 2.2 : Questionnaire 1 (partie environnement)

Environnement du couvercle	Choix de réponses
Sol	dur / mou
Inclinaison du sol	plat / en pente
Surface	sèche / glacée / enneigée / mouillée
Couvercle surélevé	oui / non

Après chaque ouverture et fermeture, l'opérateur estimait la valeur de l'effort perçu sur une échelle subjective de Borg (voir annexe 1). De même, l'opérateur devait évaluer le niveau d'adaptation de l'outil au type de couvercle manipulé en indiquant une des réponses suivantes : tout à fait adapté, adapté, plus ou moins adapté, pas adapté.

Tout commentaire de l'opérateur quant au fonctionnement et à l'efficacité de l'outil était également noté et les essais étaient filmés à l'aide d'une caméra numérique.

À la fin des observations, l'opérateur répondait au questionnaire 2, lequel énumère treize qualités généralement recherchées pour un outil de levage de couvercle (voir

tableau 2.3). Les onze premières qualités ont été proposées par Derfoul (2002) et nous avons ajouté deux qualités supplémentaires afin de mieux distinguer les performances respectives des outils comparés. Ainsi, nous tenons compte du fait que ces outils sont similaires en termes de principe de fonctionnement, car ils offrent un avantage mécanique grâce à un effet de bras de levier à l'opérateur qui est en position debout, contrairement au pic ou au crochet, par exemple.

Tableau 2.3 : Questionnaire 2

Les 13 qualités recherchées pour un outil de levage de couvercle
1. Facile à contrôler pendant l'activité
2. Sécuritaire
3. Bonne prise dans la main
4. Facile à installer sur le couvercle
5. Reste bien agrippé sur le couvercle pendant le levage
6. Facile à désinstaller du couvercle
7. Peut aider à décoller un couvercle encrassé ou gelé
8. Permet d'accomplir toutes les opérations, du début à la fin
9. Léger
10. Pratique à ranger
11. Permet d'ouvrir et fermer tous les types de couvercles
12. Bonne adhérence au sol
13. Permet d'ouvrir et fermer un couvercle sans forcer

L'opérateur pouvait se prononcer « tout à fait d'accord » avec l'énoncé d'une qualité (par ex. « je suis tout à fait d'accord que l'outil est facile à installer »), « d'accord », « plus ou moins d'accord » ou « pas d'accord ». Par la suite, l'opérateur devait choisir parmi ces treize qualités les trois qu'il juge les plus importantes pour l'ouverture et la fermeture d'un couvercle.

Enfin, sur le terrain mais avec un sujet non opérateur, un dynamomètre a été utilisé pour estimer la force requise au niveau de la poignée de l'outil pour effectuer l'ouverture de tampons et de grilles.

2.2 Protocole d'observation

Le protocole retenu dans cette étude a été approuvé par le Comité d'éthique de la recherche de l'École Polytechnique³. Dans l'ordre chronologique, les étapes du protocole étaient les suivantes :

Après avoir reçu une explication sur les buts et la nature de l'étude ainsi que sur les avantages, inconvénients et risques de participer comme sujet, l'opérateur pouvait choisir de signer ou non le formulaire de consentement de participation à cette étude. Les risques étaient ceux habituellement liés à la manipulation d'un couvercle, en plus du risque lié à l'utilisation d'un nouvel outil.

Dans le cas d'un consentement du sujet, une fiche d'identification individuelle était remplie (nom, âge, sexe, taille, poids, poste occupé, nombre d'années d'expérience en levage de couvercles, outils habituellement utilisés). Un code était attribué à l'opérateur et était utilisé pour les feuilles de collecte de données, afin de préserver son anonymat.

Le principe de fonctionnement du prototype était ensuite expliqué à l'opérateur, démonstration à l'appui. Après un ou deux essais libres, l'observation se déroulait selon les étapes décrites ici (voir aussi le schéma à la figure 2.1) :

- Ouverture du couvercle et dégagement complet du puits d'accès (filmé);
- Administration du questionnaire 1 à l'opérateur afin de déterminer :
 - Les caractéristiques du couvercle et de l'environnement;
 - L'effort perçu pour l'ouverture;
 - Le niveau d'adaptation de l'outil pour l'ouverture.
- Fermeture complète du puits d'accès (filmé);

³ En conformité avec la Politique d'éthique de la recherche avec des sujets humains (École Polytechnique de Montréal, 2002).

- Administration du questionnaire 1 à l'opérateur et évaluation :
 - De l'effort perçu pour la fermeture;
 - Du niveau d'adaptation de l'outil pour la fermeture.
- Administration du questionnaire 2 à l'opérateur et évaluation :
 - De l'outil testé par rapport aux 13 qualités recherchées;
 - Des trois qualités les plus importantes pour un outil, de façon générale.

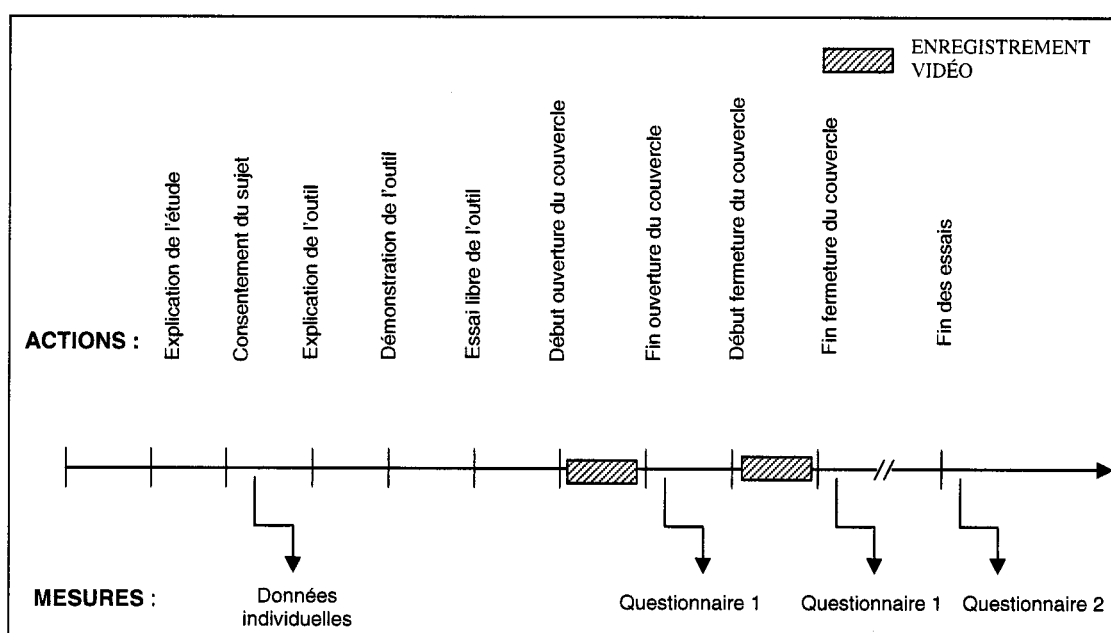


Figure 2.1 : Schéma du protocole d'observation

2.3 Prototype 1

Le prototype 1 (voir photos en figure 2.2) a été livré le 15 décembre 2003 et testé en conditions hivernales jusqu'au 30 janvier 2004. Le bouton situé sur le haut du manche sert à relâcher la sangle à cliquet. Le crochet attaché à la sangle peut se fixer sur une protubérance métallique prévue à cet effet, ce qui permet à l'opérateur d'installer le crochet sur le couvercle sans se pencher jusqu'au sol (voir images à l'annexe 2). Le crochet d'appoint, replié à l'arrière de l'outil, a été prévu par le fabricant pour décoincer

des couvercles récalcitrants (puisque l'effet élastique de la sangle pourrait l'en empêcher).

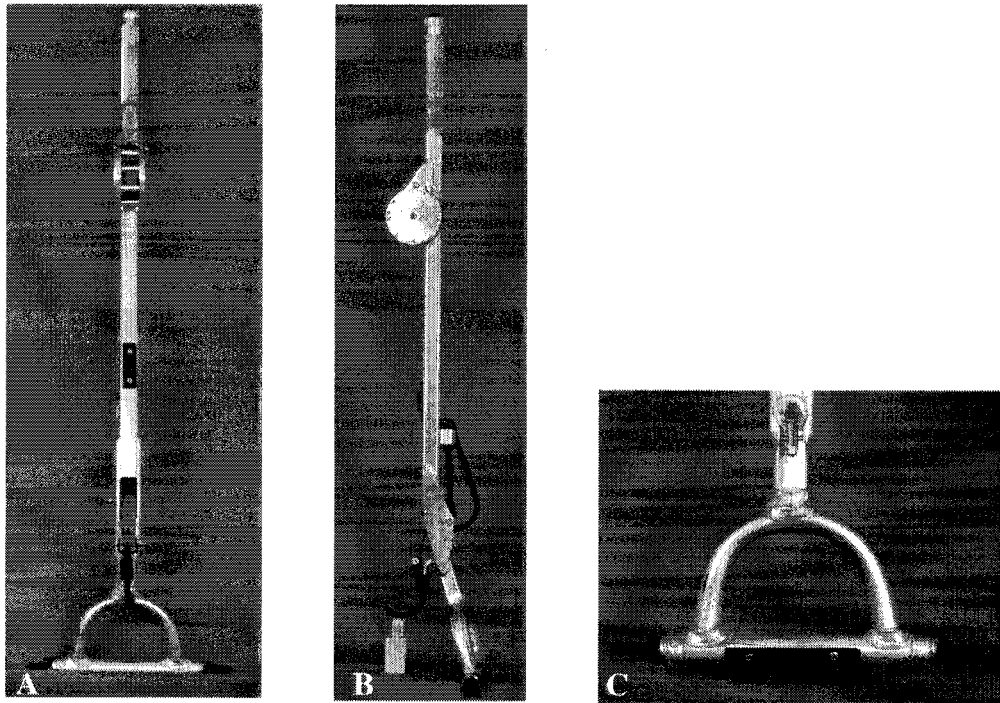


Figure 2.2 : Prototype 1 : (a) de face, (b) de profil et (c) mors

2.3.1 Sites d'observations

Les essais sur le terrain pour le prototype 1 ont eu lieu à la station d'épuration des eaux usées de la Communauté urbaine de Montréal et à l'arrondissement Notre-Dame-de-Grâce/Côte-des-Neiges de la Ville de Montréal.

2.3.2 Sujets

Six opérateurs volontaires ont participé aux observations du prototype 1. Deux individus étaient des opérateurs du réseau d'intercepteurs de la station d'épuration tandis que les quatre autres étaient opérateurs aux travaux publics de Notre-Dame-de-Grâce. Cinq sujets étaient de sexe masculin et un sujet de sexe féminin. Au total, 19 essais ont été réalisés sur le terrain.

2.3.3 Protocole et mesures

La mauvaise adhérence au sol du prototype 1 a rendu impossible l'application du protocole tel que décrit à la section 2.2. Les essais ont donc été filmés et seuls les commentaires des opérateurs quant au fonctionnement et au degré d'efficacité de l'outil ont été notés.

2.3.4 Passage au prototype 2

La mauvaise performance du prototype 1 a remis en cause la pertinence de procéder à un nombre plus élevé d'essais sur cette première génération de l'outil. Cette situation posait un risque à la sécurité des opérateurs, en plus d'empêcher une utilisation efficace de l'outil. Le fabricant a donc procédé à l'élaboration du prototype 2.

2.4 Prototype 2

Le prototype 2 a été livré le 5 février 2004 et testé en conditions hivernales jusqu'au 23 février 2004 (voir figure 2.3). Le fabricant du prototype a installé un nouveau type de mors afin d'améliorer l'adhérence au sol. Dans le même but, une partie du manche de l'outil a été modifiée afin qu'il soit possible de faire varier la hauteur de sortie de la sangle. La sangle du prototype 2 était donc ajustable selon 3 positions, dénommées S1 pour la plus basse, S2 pour celle du milieu et S3 pour la plus haute.

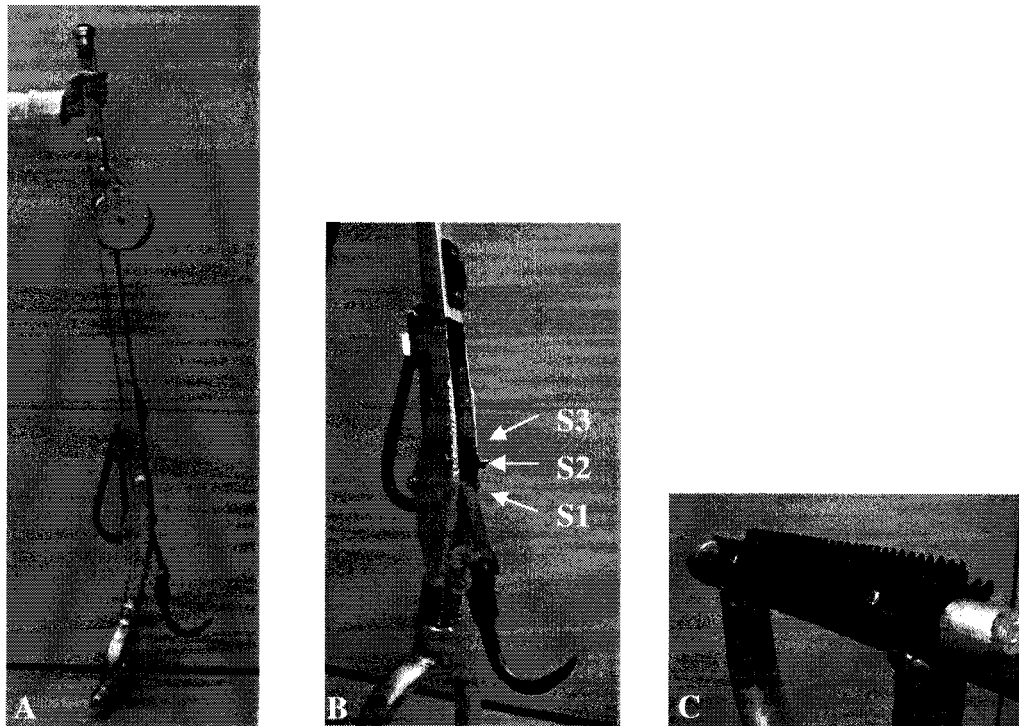


Figure 2.3 : Prototype 2 : (a) de profil, (b) points de sortie de la sangle et (c) mors

2.4.1 Sites d'observations

Les essais sur le terrain pour le prototype 2 ont eu lieu à la station d'épuration des eaux usées Montréal et à l'arrondissement Beaconsfield/Baie d'Urfé de la Ville de Montréal.

2.4.2 Sujets

Six opérateurs ont participé aux observations du prototype 2, dont un seul opérateur ayant fait partie de l'échantillon du prototype 1. Quatre individus étaient des opérateurs du réseau d'intercepteurs de la station d'épuration tandis que les deux autres étaient opérateurs de camion écreur pour les travaux publics de Beaconsfield. Cinq sujets étaient de sexe masculin et un sujet de sexe féminin. Cet échantillon a permis la réalisation de 47 essais sur le terrain.

2.4.3 Protocole et mesures

Le protocole des observations sur le terrain, tel que décrit à la section 2.2, a été suivi pour le prototype 2. Par ailleurs, chaque couvercle était ouvert trois fois par le même opérateur, c'est-à-dire avec la sangle du prototype 2 en position S1, S2 puis S3 (en ordre aléatoire).

2.4.4 Incident concernant le prototype 2

Lors des essais sur le terrain le 11 février 2004, le manche du prototype 2 s'est plié et cassé. Le fabricant a repris le prototype 2 et l'a livré réparé le 17 février, permettant la reprise des observations. Toutefois, le 19 février, le mors s'est détaché en partie de la base de l'outil, interrompant de nouveau l'étude. Il a alors été remarqué que la réparation avait accentué l'inclinaison du manche de l'outil d'environ 15° vers l'arrière, imposant ainsi une posture de travail différente aux opérateurs. Pour cette raison, les 36 observations faites avec le prototype 2 réparé, entre le 17 et le 19 février, ont été invalidées. Ainsi, sur les 47 observations, seules les 11 premières ont été retenues.

2.4.5 Passage au prototype 3

Le prototype 2 étant affaibli par la cassure et la réparation l'ayant trop courbé, le fabricant a résolu de fabriquer un nouvel exemplaire : le prototype 3.

2.5 Prototype 3

Le prototype 3 a été livré le 6 mai 2004 et testé en conditions estivales jusqu'au 10 juin 2004 (voir figure 2.4). Ce prototype est une réplique presque identique du prototype 2 à quelques détails près : le manche de l'outil est renforcé à l'arrière et sur les côtés par des plaques métalliques afin d'éviter une cassure au niveau du manche comme pour le prototype 2. Aussi, le mors a été modifié par le fabricant en retirant une rangée de dents pour améliorer l'adhérence en réduisant la surface de contact avec le sol. La sangle du prototype 3 reste également ajustable selon les mêmes 3 positions que le prototype 2 (dénommées S1, S2 et S3).

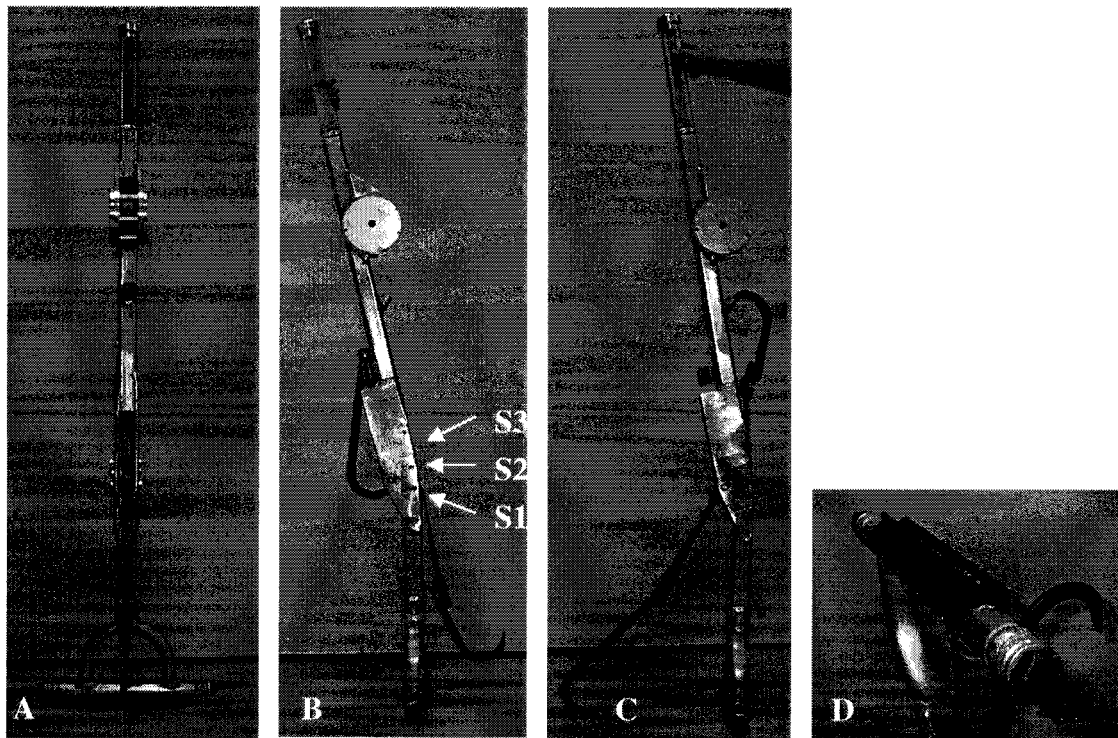


Figure 2.4 : Prototype 3 : (a) de face, (b) de profil, (c) de profil et (d) mors

2.5.1 Sites d'observations

Les essais sur le terrain pour le prototype 3 ont eu lieu dans trois arrondissements de la Ville de Montréal, soit : Beaconsfield/Baie d'Urfé, Lasalle et Notre-Dame-de-Grâce/Côte-des-Neiges ainsi que sur des installations de surface du réseau souterrain d'Hydro-Québec.

2.5.2 Sujets

Huit opérateurs ont participé à ces observations (aucun n'ayant fait partie des échantillons précédents). Cinq individus étaient opérateurs de camion écreur pour les travaux publics; d'eux d'entre eux à Beaconsfield et les trois autres dans l'arrondissement de Lasalle. Un individu était ouvrier en charge pour le réseau d'aqueduc de Notre-Dame-de-Grâce. Deux individus étaient des jointeurs chargés de la maintenance du réseau souterrain d'Hydro-Québec. Sept sujets étaient de sexe masculin

et un sujet de sexe féminin. Compte tenu de l'échantillon, 76 essais ont été réalisés sur le terrain.

2.5.3 Ajout de deux outils aux observations

Une modification au protocole de l'étude a été introduite à partir du prototype 3, qui a consisté à l'évaluation de deux outils supplémentaires : le protol, utilisé par les employés de la Ville de Montréal (figure 2.5), et l'outil fabriqué par Hydro-Québec (« outil HQ », figure 2.6). Étant donné l'existence de ces outils de levage de couvercle ayant un principe général de fonctionnement similaire à celui du prototype 3, il a été jugé opportun d'effectuer une comparaison systématique entre ces trois outils. Ces essais devaient permettre de déterminer les meilleures caractéristiques de chaque outil pour les combiner dans un design ultérieur.

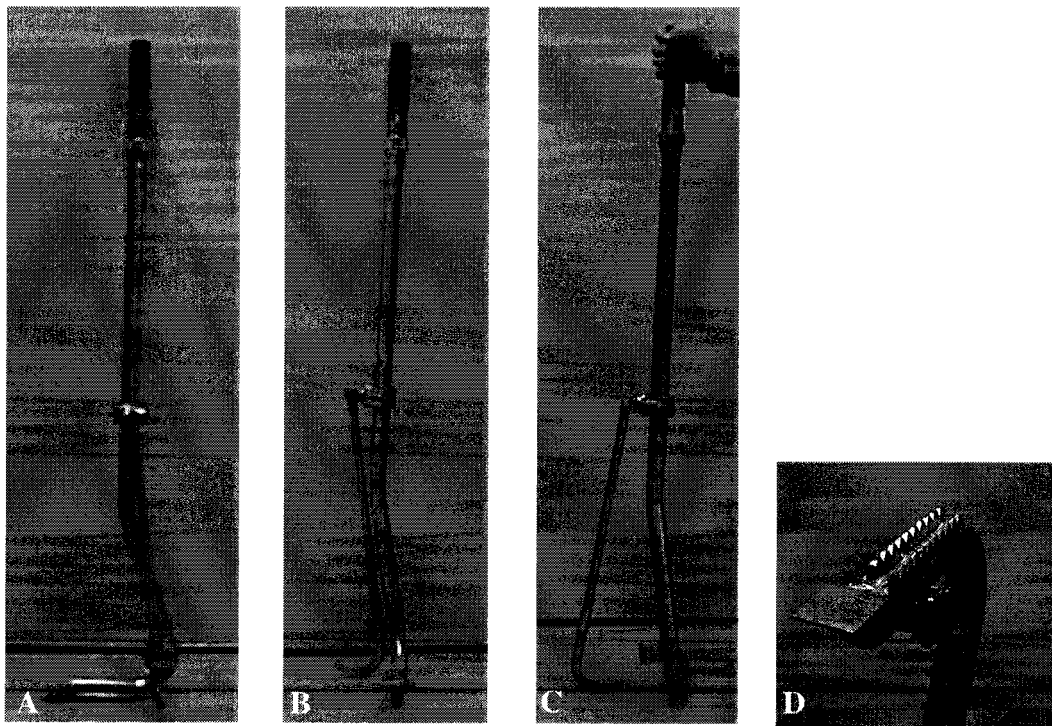


Figure 2.5 : Protol : (a) de face, (b) de profil, (c) de profil et (d) mors

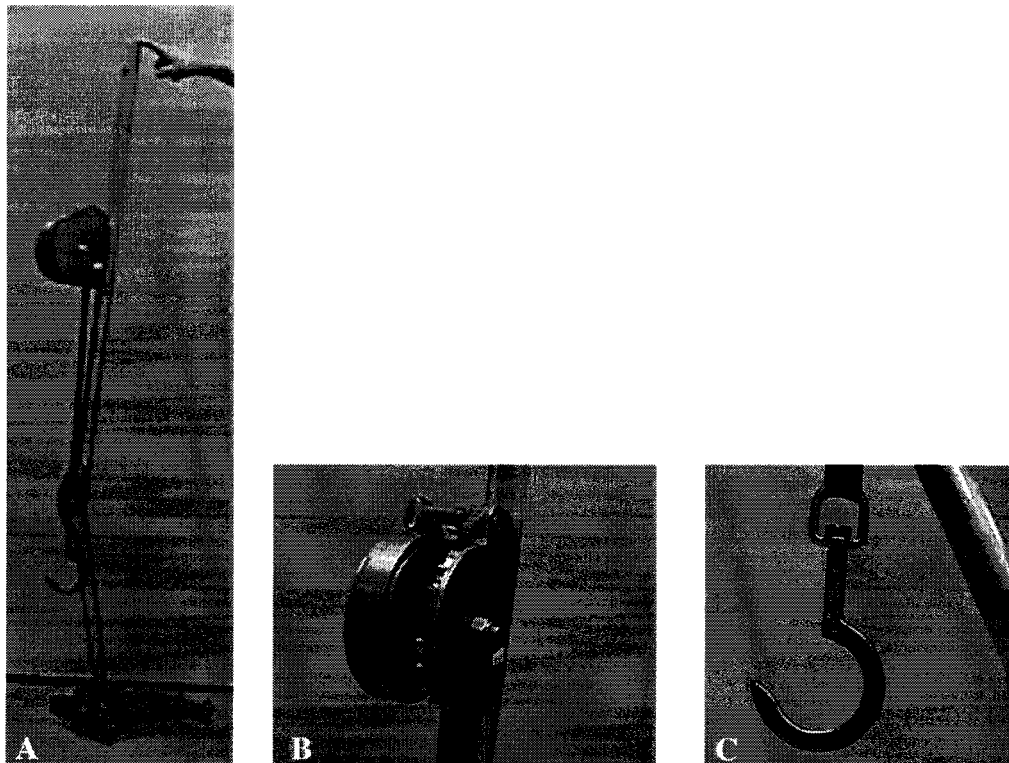


Figure 2.6 : Outil Hydro-Québec : (a) de profil, (b) sangle à cliquet et (c) crochet

2.5.4 Protocole et mesures

Les mesures prises lors des essais sur le prototype 3 ont été identiques à celles prévues au protocole d'observation. Les mêmes mesures ont aussi été prises sur les deux outils supplémentaires, le protol et l'outil HQ. D'autre part, chaque couvercle était ouvert cinq fois par le même opérateur : avec le protol, l'outil HQ et le prototype 3 avec la sangle en position S1, S2 puis S3. Les cinq essais étaient conduits selon un ordre aléatoire. À la toute fin, le questionnaire 2 était administré trois fois à l'opérateur : une fois pour le prototype 3, une fois pour le protol et une fois pour l'outil HQ.

2.5.5 Passage au prototype 4

L'analyse et la comparaison des résultats des essais sur le prototype 3, le protol et l'outil HQ ont suggéré que chaque outil avait ses avantages et inconvénients. Ce constat a donné naissance à l'idée de créer un hybride des trois outils : le prototype 4.

2.6 Prototype 4

Le prototype 4 a été livré le 9 septembre 2004. Le fabricant avait respecté la majorité des spécifications demandées : le prototype 4 est un outil de forme protol, doté d'un système sangle-ressort, d'une double poignée et de trois positions de sangles (voir figure 2.7). Toutefois, un défaut dans le système sangle-ressort a causé le bris du ressort le lendemain en laboratoire. Le fabricant a réparé le prototype 4 et l'a livré de nouveau le 22 septembre. Les observations se sont alors déroulées en conditions automnales jusqu'au 14 octobre 2004.

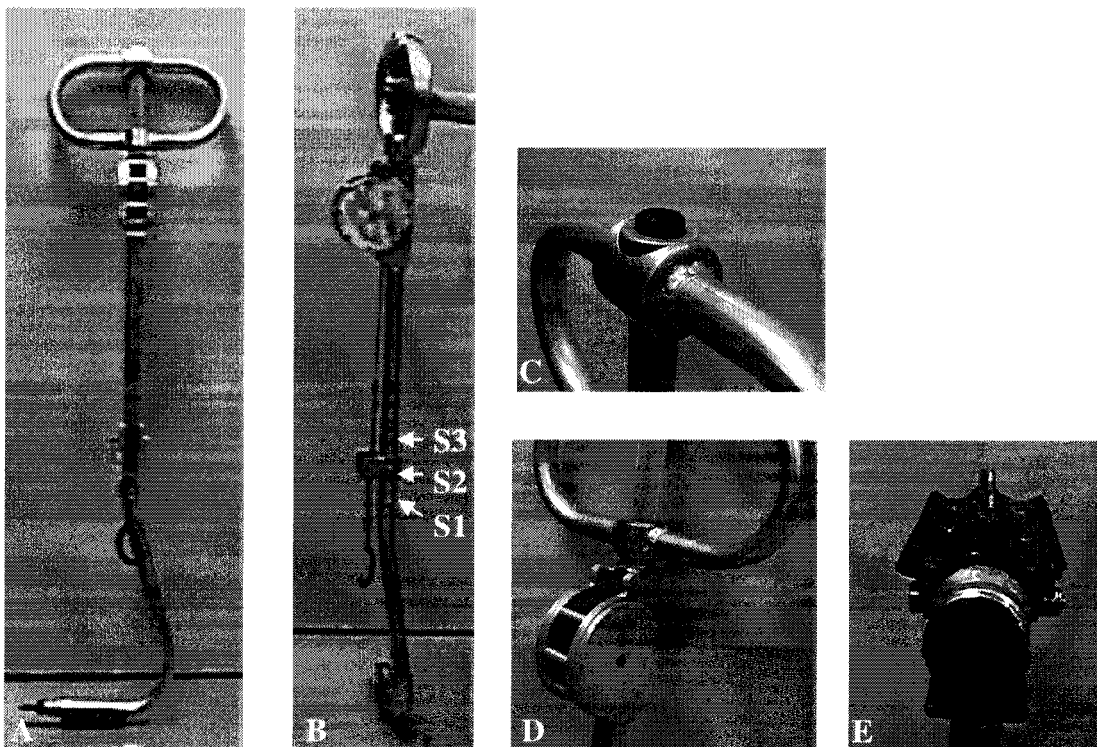


Figure 2.7 : Prototype 4 : (a) de face, (b) de profil, (c) bouton, (d) sangle et (e) mors

2.6.1 Sites d'observations

Les essais sur le terrain pour le prototype 4 ont eu lieu dans deux arrondissements de la Ville de Montréal (Notre-Dame-de-Grâce/Côte-des-Neiges et Beaconsfield/Baie

d'Urfé), à la station d'épuration des eaux usées de Montréal ainsi que sur le réseau souterrain d'Hydro-Québec.

2.6.2 Sujets

Neuf opérateurs ont participé à ces observations, desquels quatre avaient fait partie de d'un des échantillons précédents. Deux individus étaient opérateurs de camion écurer à Beaconsfield et deux individus étaient ouvriers des eaux pour l'aqueduc de Notre-Dame-de-Grâce. Deux individus étaient opérateurs sur les intercepteurs de la station d'épuration des eaux et trois individus étaient jointeurs chez Hydro-Québec. Six sujets étaient de sexe masculin et trois sujets de sexe féminin. Compte tenu de l'échantillon, 50 essais ont été réalisés sur le terrain.

2.6.3 Protocole et mesures

Les mesures prises lors des essais sur le prototype 4 ont été identiques à celles prévues au protocole d'observation. Chaque couvercle était ouvert trois fois par le même opérateur : avec la sangle en position S1, S2 puis S3, selon un ordre aléatoire. À la toute fin, le questionnaire 2 était administré à l'opérateur.

2.7 Traitement des données

2.7.1 Bases de données

Les données qualitatives et quantitatives recueillies à l'aide de la fiche d'identification individuelle et des questionnaires 1 et 2 ont été compilées dans une base de données Excel. Des analyses statistiques descriptives et univariées ont ensuite été effectuées avec le logiciel JMP (SAS Institute) concernant les prototypes 2, 3 et 4, le protol et l'outil HQ.

2.7.2 Analyses vidéos

Les séquences vidéos des essais des prototypes 2, 3 et 4, du protol et de l'outil HQ ont été analysées avec le logiciel The Observer (Noldus) afin de connaître la durée des étapes d'ouverture et fermeture des couvercles ainsi que la fréquence des incidents associés. Le protocole d'analyse a été déterminé à partir de celui de l'étude de Imbeau et coll. (2003), qui considèrent que l'ouverture d'une grille ou d'un tampon peut comporter jusqu'à cinq étapes. Nous avons analysé ici les étapes suivantes, pour l'ouverture :

- Installer le crochet sur le couvercle;
- Décoller le couvercle du cadre;
- Dégager le puits d'accès complètement;
- Désinstaller le crochet du couvercle.

Et pour la fermeture :

- Installer le crochet sur le couvercle;
- Fermer le puits d'accès;
- Désinstaller le crochet du couvercle.

De plus, quatre types d'incidents ont été analysés à partir des vidéos :

- Perte d'adhérence au sol

Au moment où l'opérateur exerce un effort, une perte d'adhérence de l'outil au sol se produit. L'opérateur se trouve alors en situation de déséquilibre et doit se repositionner avant d'appliquer un nouvel effort.

- Sortie du crochet

Pendant une des étapes d'ouverture ou de fermeture, le crochet sort spontanément du trou d'ancrage (tampon) ou de la rainure (grille). L'opérateur doit alors le réinstaller pour poursuivre l'opération.

- Réinstallation du crochet

Le crochet sort spontanément du trou d'ancrage ou de la rainure et l'opérateur doit le réinstaller pour terminer l'activité. Deuxième cas de figure, l'opérateur n'arrive pas à

terminer une étape dû à un mauvais positionnement du crochet sur le couvercle. Il le désinstalle donc volontairement et le réinstalle ensuite.

- Autres incidents

Pendant l'ouverture ou la fermeture, l'opérateur se cogne contre l'outil ou contre un autre obstacle dans l'environnement (ex. un poteau à proximité).

2.7.3 Analyses de contraintes biomécaniques

Enfin, le logiciel d'analyse de contraintes biomécaniques 3D Static Strength Prediction Program (3DSSPP, University of Michigan) a été utilisé pour traiter certaines images tirées des séquences vidéo des prototypes 3 et 4, du protol et de l'outil HQ. Ce logiciel permet d'estimer les moments résultants aux articulations lors de l'application de forces statiques ou quasi-statiques. Puisque les activités « décoller le couvercle » et « dégager le puits d'accès » sont jugées les plus difficiles selon l'étude de Imbeau et coll. (2003), les prises sur image ont été effectuées au moment de l'effort maximal dans ces activités; ces images ont par la suite été traitées avec 3DSSPP afin d'estimer la valeur de la contrainte au dos en L₅/S₁ et la proportion de travailleurs nord-américains en santé ayant suffisamment de force musculaire pour réaliser la tâche.

2.7.4 Résumé des observations

Le tableau 2.4 résume l'ensemble des mesures réalisées lors des observations avec les prototypes 1 à 4, le protol et l'outil HQ.

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS

Ce chapitre traite d'abord des résultats obtenus avec le prototype 1, car ils ont été plus limités. Ensuite, les résultats des autres outils et prototypes sont regroupés et présentés selon les méthodes de collecte de données.

3.1 Résultats des essais avec le prototype 1

Le prototype 1 a rapidement montré ses limites lors des essais sur le terrain. En effet, les séquences vidéos ont montré que sur les 6 opérateurs interrogés, deux d'entre eux avaient été incapables de dégager complètement un puisard fermé par un tampon sans pattes de diamètre 78 cm (31 pouces)⁴ pesant 134 kg. Selon les opérateurs, le problème principal résidait dans le manque d'adhérence au sol du mors de l'outil, notamment lors des conditions hivernales présentes au moment des essais (c'est-à-dire surface glacée ou enneigée).

Étant donné la piètre performance du prototype 1 sur le terrain, celui-ci n'a pas fait l'objet d'analyses quantitatives, mais seulement qualitatives. Le tableau 3.1 présente les principaux commentaires des opérateurs.

⁴ Les mesures en système impérial sont aussi indiquées, car elles sont d'usage sur le terrain.

Tableau 3.1 : Commentaires des opérateurs sur le prototype 1

Commentaires positifs	Commentaires négatifs
« Le principe de la sangle à cliquet permet une économie de mouvements »	« L'adhérence au sol est insuffisante »
« La longueur de la sangle permet de s'installer où l'on veut autour du couvercle »	« L'outil est lourd »
« La protubérance permet de moins se pencher pour installer le crochet sur le couvercle »	« De nombreuses manipulations sont requises pour installer le crochet sur la protubérance »

Par ailleurs, les essais sur le terrain ont permis de démontrer que le prototype ne permettait effectivement pas d'ouvrir les tampons à pattes, puisqu'il ne permet pas de les soulever suffisamment (de façon verticale) hors du cadre.

Les observations et commentaires recueillis au sujet du prototype 1 ont néanmoins permis de passer à la conception du prototype 2. En effet, c'est à ce moment que nous avons posé l'hypothèse que la hauteur du point de sortie de la sangle sur le manche du prototype influençait à la fois l'effort perçu par l'opérateur et la qualité de l'adhérence au sol. Pour cette raison, nous avons demandé au fabricant de modifier le manche de l'outil afin de permettre d'ajuster la hauteur de la sangle selon trois niveaux (S1 étant le plus bas, S2 celui du milieu et S3 le plus haut – voir figure 2.3).

3.2 Agrégation des résultats des prototypes 2 et 3

Pour les besoins de l'analyse, les résultats des essais des prototypes 2 et 3 ont été agrégés et sont présentés ensemble ici. En effet, à la suite du bris du prototype 2, le prototype 3 a été fabriqué pour le remplacer. Or, seuls des changements mineurs au niveau du mors ont été introduits. La similitude entre ces outils rendrait donc imperceptibles les variations sur des mesures prises à l'aide d'échelles subjectives (par exemple, l'échelle de Borg) ou des estimations de postures obtenues à partir

d'enregistrements vidéo. Pour cette raison, les résultats du prototype 3 comprennent aussi ceux du prototype 2.

3.3 Sujets

Les 19 individus qui ont participé aux observations (excluant celle du prototype 1) avaient une moyenne d'âge de 46,8 ans (écart-type de 7,2 ans) et leur nombre d'années d'expérience en levage de couvercle (comme égoutier, jointeur ou autre) s'élevait en moyenne à 8,2 ans (écart-type de 9,5 ans). Chez les 15 individus de sexe masculin, le poids moyen était de 91,6 kg (écart-type de 16,0 kg) et la taille moyenne de 1,77 m (écart-type de 5,8 cm). Pour les 4 individus de sexe féminin, le poids moyen était de 58,5 kg (écart-type de 7,4 kg) et la taille moyenne de 1,66 m (écart-type de 5,7 cm).

3.4 Résultats du questionnaire 1

Les résultats rapportés ici concernent les essais sur le protol, l'outil HQ et les prototypes 3 et 4. Chacun des prototypes a été testé en faisant varier la hauteur du point de sortie de la sangle (niveaux S1, S2 et S3).

3.4.1 Caractéristiques des couvercles

Le tableau 3.2 indique le nombre de couvercles testés, selon le type d'outil. Les couvercles sont de types « tampon sans pattes » et « grille circulaire » (à rainures horizontales ou obliques).

Tableau 3.2 : Nombre d'essais, par type de couvercle et par outil

Outil	Hauteur de sangle	N Tampons sans pattes	N Grilles circulaires	
Prototype 3	S1	12	4	
	S2	12	5	
	S3	14	6	
Protol	-	9	6	
Outil HQ	-	10	6	
Prototype 4	S1	10	8	
	S2	7	8	
	S3	9	8	
Sous total		83	51	Total : 134

Note : Un essai comporte à la fois une ouverture et une fermeture.

Au total, le prototype 3 a été testé sur 38 tampons et 15 grilles circulaires. Le protol, lui, a été testé sur 9 tampons et 6 grilles et l'outil HQ sur 10 tampons et 6 grilles. Enfin, le prototype 4 a été testé sur 26 tampons et 24 grilles.

Sur l'ensemble des 83 tampons sans pattes, 57% présentaient quatre trous d'ancrage et 21% en avaient huit. Le diamètre des tampons variait entre 61 et 83 cm (24 et 32,5 po), mais 51% d'entre eux avaient un diamètre de 81 cm (32 po). Le poids de ces tampons se situait entre 77 et 134 kg, mais se situait généralement à 134 kg. La forme du dessous était conique (72% des tampons) ou plate (27%).

Pour ce qui est des 51 grilles rencontrées sur le terrain, 72% d'entre elles présentaient des rainures horizontales, contrairement à des rainures obliques. Toutes possédaient deux encoches sur le côté ainsi qu'un système d'emboîtement. Leur diamètre variait de 74 à 79 cm (29 à 31 po). Le poids était typiquement de 96 kg pour une grille à rainures horizontales et de 86 kg pour une grille à rainures obliques. La forme du dessous était arrondie (67% des grilles) ou plate (33%).

3.4.2 Caractéristiques de l'environnement

Dans tous les cas observés, le sol était dur (surface d'asphalte ou de béton) et le couvercle n'était pas surélevé par rapport au sol. Dans 97% des cas, le sol était plat plutôt qu'en pente. L'état de la surface a pu varier selon les saisons : sec (73%), mouillé (23%) ou glacé (5%).

3.4.3 Effort perçu (échelle de Borg)

Les tableaux suivants détaillent les résultats obtenus concernant l'effort perçu après chaque ouverture et fermeture. Les opérateurs se prononçaient à partir de l'échelle subjective de Borg (variant de 0 à 10, voir annexe 1) où 0 signifie « rien du tout » comme effort et 10 signifie un effort extrêmement élevé. Les deux dernières colonnes de chaque tableau correspondent à la moyenne de l'effort perçu pour tous les types de couvercles confondus. L'analyse de la variance a montré que les résultats pour l'ouverture des tampons variaient de façon statistiquement significative selon l'outil utilisé ($F_{7,73}=2,54$, $p<.0216$); ces résultats sont suivis d'un astérisque dans le tableau. De plus, un test de moyennes montre qu'il existe une différence significative pour la paire outil HQ et prototype 4 en S3 (test de Tuckey-Kramer). Il est à noter que pour les besoins de l'analyse, nous avons considéré que les prototypes ayant différentes hauteurs de sangle constituaient des outils distincts (il y a donc un total de 8 « outils » dans les tableaux). Par ailleurs, les résultats sur l'échelle de Borg pour l'ouverture, tous types de couvercles confondus, varient de façon presque significative selon l'outil employé ($F_{7,124}=2,03$, $p<.0570$).

Tableau 3.3 : Moyenne de l'effort perçu sur l'échelle de Borg pour le prototype 3

Prototype 3	Tampons N = 38		Grilles N = 15		Tous couvercles N = 53	
	Ouverture	Fermeture	Ouverture	Fermeture	Ouverture	Fermeture
S1 (N = 16)	1,7*	1,7	1,8	2,5	1,7	1,8
S2 (N = 17)	1,9*	1,9	1,6	2,4	1,8	2,0
S3 (N = 20)	1,9*	1,7	1,9	3,0	1,9	2,0

* $p<.05$.

Tableau 3.4 : Moyenne de l'effort perçu sur l'échelle de Borg pour le protol

	Tampons N = 9		Grilles N = 6		Tous couvercles N = 15	
	Ouverture	Fermeture	Ouverture	Fermeture	Ouverture	Fermeture
Protol	1,9*	1,7	1,6	1,8	1,7	1,8

* p<.05.

Tableau 3.5 : Moyenne de l'effort perçu sur l'échelle de Borg pour l'outil HQ

	Tampons N = 10		Grilles N = 6		Tous couvercles N = 16	
	Ouverture	Fermeture	Ouverture	Fermeture	Ouverture	Fermeture
Outil HQ	1,2*	1,3	1,3	1,2	1,2	1,3

* p<.05.

Tableau 3.6 : Moyenne de l'effort perçu sur l'échelle de Borg pour le prototype 4

Prototype 4	Tampons N = 24		Grilles N = 24		Tous couvercles N = 48	
	Ouverture	Fermeture	Ouverture	Fermeture	Ouverture	Fermeture
S1 (N = 17)	1,9*	1,7	1,8	1,9	1,9	1,8
S2 (N = 15)	2,0*	1,8	1,9	1,8	1,9	1,8
S3 (N = 16)	2,8*	2,3	1,8	1,7	2,3	2,0

* p<.05.

Ces résultats démontrent que l'outil HQ est perçu comme celui qui requiert le moins d'effort physique pour l'ouverture d'un tampon, avec une moyenne d'effort perçu de 1,2 sur 10. C'est aussi vraisemblablement le cas lorsque l'on confond les résultats des deux types de couvercles.

Pour ce qui est des prototypes 3 et 4, l'hypothèse de l'influence de la hauteur de la sangle sur l'effort n'est pas vérifiée statistiquement, mais pour les tampons on observe une tendance à la hausse de l'effort lorsque la sangle est plus haute (par ex. à S3), particulièrement pour le prototype 4, ce qui correspond aux commentaires généraux des opérateurs. La hauteur de la sangle n'a toutefois pas d'influence sur l'effort perçu lors de la manipulation d'une grille. Cela pourrait être dû au fait que le maniement des grilles

requiert plus de dextérité que de force. En effet, la difficulté consiste plutôt à replacer les encoches des grilles vis-à-vis le système d'emboîtement du cadre que de les soulever, puisque les grilles sont plus légères que les tampons (par ex., 96 kg plutôt que 134 kg).

À ce sujet, une amélioration notable en ce qui concerne la fermeture des grilles s'est produite avec le passage du prototype 3 au prototype 4 : le degré d'effort perçu, qui se situait entre 2,5 et 3,0, a diminué pour se retrouver entre 1,7 et 1,9.

Enfin, pour le protol, les opérateurs ont indiqué qu'ils percevaient approximativement le même niveau d'effort (1,7) pour l'ouverture, tous types de couvercles confondus, que pour le prototypes 3 en S1 (1,7) et le prototype 4 en S1 (1,9).

Il est à noter que la majorité des résultats se situe entre 1,2 et 2,0 sur une échelle de 10, où 1 est un effort « très faible » et 2 est « faible », tandis que le score le plus haut est de 3, ce qui est un effort « moyen ». Il en ressort donc que les opérateurs n'ont pas ressenti que ces outils requéraient un effort exagérément élevé.

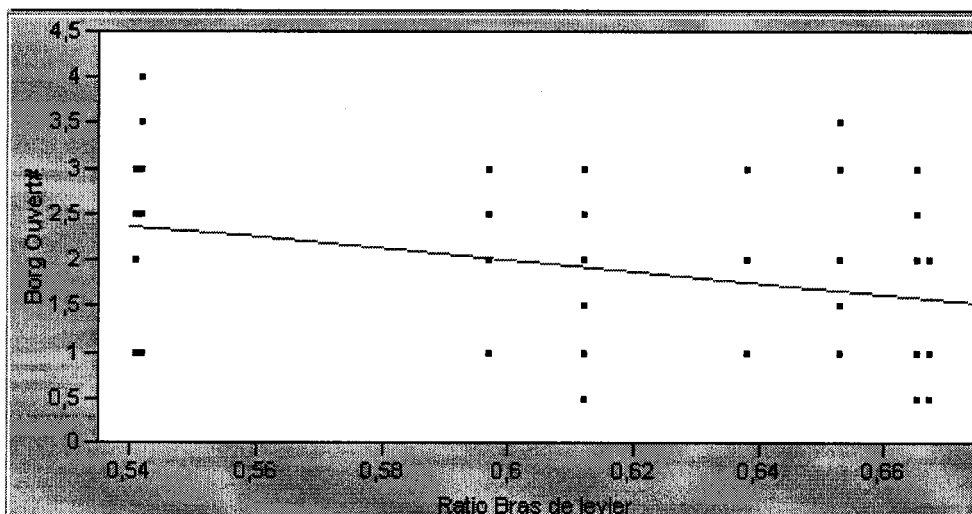
3.4.4 Effet du bras de levier sur l'effort perçu

L'avantage mécanique offert à l'opérateur dépend directement de la longueur du bras de levier d'un outil; plus il est long, plus l'ouverture sera facile. Le tableau 3.7 indique le ratio du bras de levier pour chaque outil; le calcul consiste simplement à diviser la longueur du bras de levier (partie supérieure du manche, voir figure 4.2) par la longueur totale de l'outil; ainsi, le protol a le plus faible ratio (0,54), tandis que l'outil HQ a le plus élevé (0,67).

Tableau 3.7 : Ratio du bras de levier, selon l'outil

Outil	Niveau de sangle	Hauteur bras de levier (cm)	Hauteur outil (cm)	Ratio
Prototype 3	S1	95,7	144	0,665
	S2	91,9	144	0,638
	S3	88,1	144	0,612
Protol	-	64,4	119	0,541
Outil HQ	-	91,5	137,2	0,667
Prototype 4	S1	89,4	137,2	0,653
	S2	81,9	137,2	0,597
	S3	74,3	137,2	0,542

Le graphique de la figure 3.1 permet d'apprécier l'effet du ratio du bras de levier sur l'effort perçu par l'opérateur lors de l'ouverture, pour tous les types de tampons. L'effort perçu sur l'échelle de Borg varie de façon significative selon la valeur du ratio de bras de levier ($F_{1,79}=8,75$, $p<.0041$), toutefois le modèle obtenu par régression linéaire simple sur le nuage de points ne permet pas d'expliquer significativement la relation ($R^2 = 0,1$). On observe toutefois une tendance selon laquelle l'effort perçu semble diminuer lorsque le bras de levier augmente.

**Figure 3.1 : Effet du bras de levier sur l'effort perçu (échelle de Borg)**

3.4.5 Niveau d'adaptation de l'outil

Lors des essais, les opérateurs devaient indiquer s'ils jugeaient l'outil adapté à l'ouverture et à la fermeture du type de couvercle rencontré. Les choix de réponse étaient : « tout à fait adapté », « adapté », « plus ou moins adapté », « pas adapté ».

Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants où le pourcentage représente la proportion d'opérateurs qui ont affirmé que l'outil était « adapté » ou « tout à fait adapté » au couvercle. Par exemple, le tableau 3.8 indique que lors de 67% des essais, les opérateurs ont jugé que le prototype 3 en position S1 était adapté ou tout à fait adapté à l'ouverture d'un tampon. On peut donc en déduire que lors de 33% des essais, les opérateurs ont jugé le même outil « plus ou moins adapté » ou « pas adapté » à ce type de couvercle. Les pourcentages obtenus varient de façon statistiquement significative, selon l'outil, pour l'ouverture des grilles ($\chi^2_{7,43}=13,91$, $p<0.053$) et leur fermeture ($\chi^2_{14,35}=23,42$, $p<0.054$), mais pas pour les tampons. Cependant, lorsque l'on compare les pourcentages obtenus sans distinction du type de couvercle, les résultats varient de façon statistiquement significative pour l'ouverture ($\chi^2_{7,124}=17,76$, $p<0.013$), et de façon presque significative pour la fermeture ($\chi^2_{14,116}=22,26$, $p<0.074$).

Tableau 3.8 : Proportion d'essais où le prototype 3 a été jugé adapté au couvercle

Prototype 3	Tampons N = 38		Grilles N = 15		Tous couvercles N = 53	
	Ouverture	Fermeture	Ouverture	Fermeture	Ouverture	Fermeture
S1 (N = 16)	67	66	50*	0*	63*	53
S2 (N = 17)	67	50	40*	25*	59*	44
S3 (N = 20)	57	64	33*	25*	50*	55

* $p<0.05$.

Tableau 3.9 : Proportion d'essais où le protol a été jugé adapté au couvercle

Protol	Tampons N = 9		Grilles N = 6		Tous couvercles N = 15	
	Ouverture	Fermeture	Ouverture	Fermeture	Ouverture	Fermeture
Protol	67	66	66*	50*	67*	60

* $p<0.05$.

Tableau 3.10 : Proportion d'essais où l'outil HQ a été jugé adapté au couvercle

	Tampons N = 10		Grilles N = 6		Tous couvercles N = 16	
	Ouverture	Fermeture	Ouverture	Fermeture	Ouverture	Fermeture
Outil HQ	70	70	67*	20*	69*	53

* p<.05.

Tableau 3.11 : Proportion d'essais où le prototype 4 a été jugé adapté au couvercle

Prototype 4	Tampons N = 24		Grilles N = 24		Tous couvercles N = 48	
	Ouverture	Fermeture	Ouverture	Fermeture	Ouverture	Fermeture
S1 (N = 17)	89	100	75*	75*	82*	88
S2 (N = 15)	100	100	100*	75*	100*	86
S3 (N = 16)	88	88	100*	88*	94*	84

* p<.05.

Ces résultats montrent que le prototype 4 a obtenu les plus fortes proportions d'avis favorables quant à l'ouverture et la fermeture de tampons (88%, 89% et 100%). La fermeture de grilles reste un peu plus difficile (75%, 75% et 88% d'accord) à cause du système d'emboîtement, selon les opérateurs.

L'outil HQ suit de près en ce qui concerne l'ouverture et la fermeture d'un tampon (70% d'accord), mais seulement 20% des opérateurs le jugent adapté à la fermeture d'une grille. Le caractère plus encombrant du plateau de cet outil pourrait être à l'origine de ce faible résultat; en effet, il se prête mal aux nombreux repositionnements nécessaires à la fermeture d'une grille à emboîtement.

Les résultats du protol sont quant à eux moyens : 67% d'opérateurs sont d'accord pour l'ouverture et 60% pour la fermeture, tous types de couvercles confondus. La longueur réduite du bras rigide du protol constitue le facteur limitatif des déplacements des opérateurs; lors de la fermeture par exemple, la personne doit progressivement faire le tour du puits d'accès en tirant le couvercle vers le trou. Le système de sangle de l'outil

HQ et des prototypes permet, quant à lui, de se placer directement de l'autre côté du trou pour effectuer la fermeture.

Enfin, le prototype 4 avec la sangle en S2 a le plus souvent été jugé « adapté » ou « tout à fait adapté », avec en moyenne 100% d'avis favorables pour l'ouverture et 86% pour la fermeture, tous types de couvercles confondus.

3.5 Résultats des analyses vidéo

Les enregistrements vidéo ont servi à déterminer la durée moyenne des étapes d'ouverture et de fermeture des couvercles, à relever les incidents survenus lors des essais et à analyser les contraintes biomécaniques liées aux postures de travail.

3.5.1 Durée des étapes

Afin de comparer les outils en termes de temps et fréquences, nous avons mesuré le temps requis pour les activités d'ouverture et de fermeture en décortiquant celles-ci en étapes, tel que décrit dans la méthodologie (section 2.7.2). Les quatre étapes d'ouverture analysées ici sont :

- (1) Installer le crochet de l'outil sur le couvercle ;
- (2) Décoller le couvercle du cadre à l'aide de l'outil ;
- (3) Dégager le puits d'accès complètement à l'aide de l'outil ;
- (4) Désinstaller le crochet du couvercle.

Trois étapes composant la fermeture d'un couvercle ont aussi été analysées :

- (1) Installer le crochet de l'outil sur le couvercle ;
- (2) Fermer le puits d'accès complètement à l'aide de l'outil ;
- (3) Désinstaller le crochet du couvercle.

Les tableaux 3.12 et 3.13 indiquent les temps mesurés sur le terrain pour les tampons; par exemple, l'installation du crochet du protol a pris en moyenne 7,0 secondes, sur 7 ouvertures observées. Seules les durées de l'étape d'installation du crochet en vue de l'ouverture varient de façon statistiquement significative en fonction de l'outil ($F_{7,51} = 3,107$, $p < .0083$), selon l'analyse de la variance. Par ailleurs, si l'on regroupe les outils sans distinction de hauteur de sangle, on ne trouve pas de significativité non plus, sauf pour cette étape. Les autres chiffres sont donc donnés à titre indicatif seulement et doivent être interprétés avec prudence.

Tableau 3.12 : Durée moyenne des étapes d'ouverture d'un tampon, selon l'outil

Outil	Durée moyenne en secondes				
	N	Installer	Décoller	Dégager	Désinstaller
Prototype 3 (S1)	9	11,1**	7,2	10,8	3,3
Prototype 3 (S2)	9	17,1**	6,7	12,4	3,2
Prototype 3 (S3)	12	10,8**	6,3	10,8	3,8
Protol	7	7,0**	5,9	6,9	3,8
Outil HQ	10	7,5**	4,9	9,1	3,1
Prototype 4 (S1)	8	5,3**	7,0	11,0	2,2
Prototype 4 (S2)	6	6,3**	8,5	10,3	1,9
Prototype 4 (S3)	8	5,9**	7,0	10,2	2,6
Total	69				

** $p < .01$.

Tableau 3.13 : Durée moyenne des étapes de fermeture d'un tampon, selon l'outil

Outil	Durée moyenne en secondes			
	N	Installer	Fermer	Désinstaller
Prototype 3 (S1)	9	8,8	15,8	6,2
Prototype 3 (S2)	9	14,2	16,0	4,6
Prototype 3 (S3)	12	8,0	15,5	4,2
Protol	7	6,2	11,1	5,2
Outil HQ	10	11,0	9,7	6,2
Prototype 4 (S1)	8	4,1	11,0	3,0
Prototype 4 (S2)	6	2,8	10,6	3,3
Prototype 4 (S3)	7	5,3	9,0	4,3
Total	68			

Les résultats concernant les tampons montrent que l'étape d'installation du crochet en vue de l'ouverture est la plus longue avec le prototype 3 (entre 10,8 et 17,1 secondes). Ceci est dû au fait que pour bénéficier de la possibilité de se pencher moins pour installer le crochet, l'opérateur doit d'abord installer le crochet sur la protubérance prévue à cet effet (voir photo de l'outil, figure 2.4). D'après nos observations, cette étape requiert autour de 4 à 5 secondes, avant l'ouverture et avant la fermeture. Les autres outils permettent une installation plus rapide, variant entre 5,1 et 7,5 secondes.

L'étape suivante, celle du décollement de la plaque, a pris en moyenne 5 à 8,5 secondes, peu importe l'outil utilisé. Un outil se démarque davantage à l'étape du dégagement : le protol semble être le plus rapide avec une moyenne de 6,9 secondes. Le dégagement avec le prototype 4, lui, dure entre 10,2 et 11,0 secondes, ce qui est comparable aux 9,5 secondes obtenues par l'outil HQ. Quant au prototype 3, ses résultats tournent aussi autour des 11 secondes.

Pour la fermeture des tampons, le prototype 3 obtient les temps les plus longs (environ 16 secondes), ce qui, d'après les observations vidéo, s'explique par le fait que la mauvaise adhérence au sol de l'outil forçait l'opérateur à se repositionner plusieurs fois (voir section 3.5.2 pour plus de détails). Quant à eux, les deux autres outils pourvus d'une sangle (HQ et prototype 4) permettent à l'opérateur un léger gain de temps par rapport au protol, puisque les durées sont de 9,0 et 9,7 secondes plutôt que de 11,1 secondes. Ceci constitue un des avantages du système de la sangle par rapport au bras rigide du protol.

Il est à noter que nous avons considéré que l'opérateur, suite à l'ouverture, désinstallait le crochet du couvercle pour ensuite l'installer de nouveau avant de procéder à la fermeture. Toutefois, dans les conditions réelles (surtout pour les tampons), il peut arriver que l'opérateur saute ces deux étapes désinstaller/installer le crochet pour gagner du temps. En effet, il n'a qu'à laisser le crochet sur le trou d'ancrage et à déposer l'outil sur le sol. Lorsqu'il est prêt à fermer le couvercle, il le tire dans le sens opposé de l'ouverture et le couvercle pivote sur lui-même avant de venir refermer le puits.

Les tableaux 3.14 et 3.15 présentent les résultats concernant les grilles circulaires. L'analyse de la variance a montré que la durée d'installation du crochet en vue de l'ouverture varie de façon statistiquement significative selon l'outil ($F_{7,35} = 2,485$, $p < 0,0351$). Dans le tableau 3.15, trois moyennes ont été recalculées en excluant une valeur isolée; ce dernier résultat est présenté entre parenthèses. Comme dans le cas des deux tableaux précédents, si l'on regroupe les outils sans distinction de hauteur de sangle, on ne trouve pas plus de significativité.

Tableau 3.14 : Durée moyenne des étapes d'ouverture d'une grille, selon l'outil

Outil	Durée moyenne en secondes				
	N	Installer	Décoller	Dégager	Désinstaller
Prototype 3 (S1)	4	13,4*	13,1	9,7	3,3
Prototype 3 (S2)	5	12,0*	10,4	19,0	3,2
Prototype 3 (S3)	3	7,7*	7,0	4,4	3,8
Protol	7	8,3*	7,5	18,0	3,8
Outil HQ	7	13,0*	5,1	16,6	3,1
Prototype 4 (S1)	8	4,9*	6,4	8,1	2,2
Prototype 4 (S2)	7	6,5*	5,5	7,1	1,9
Prototype 4 (S3)	8	4,8*	6,3	7,5	2,6
Total	49				

* p<.05.

Tableau 3.15 : Durée moyenne des étapes de fermeture d'une grille, selon l'outil

Outil	Durée moyenne en secondes			
	N	Installer	Fermer	Désinstaller
Prototype 3 (S1)	3	8,2	32,7	2,5
Prototype 3 (S2)	4	14,5	24,6	8,0
Prototype 3 (S3)	3	10,3	31,6	3,7
Protol	6	8,4	25,0	2,5
Outil HQ	5	6,3	33,1	3,2
Prototype 4 (S1)	8 (7)	4,8	34,6 (29,0 ^a)	6,0
Prototype 4 (S2)	7 (6)	9,2	42,8 (28,0 ^b)	2,4
Prototype 4 (S3)	8 (7)	6,9	36,2 (26,8 ^c)	2,4
Total	44 (41)			

^a Un essai a pris 74,3 secondes; sans celui-ci, la moyenne serait de 29,0 s^b Un essai a pris 131,8 secondes; sans celui-ci, la moyenne serait de 28,0 s.^c Un essai a pris 102,2 secondes; sans celui-ci, la moyenne serait de 26,8 s

Les essais sur les grilles ont permis d'observer que le prototype 3 en S3 était l'outil le plus rapide avec une moyenne de 4,4 secondes pour le dégagement du couvercle. Toutefois, ce résultat est contrebalancé par les 19,0 secondes obtenues avec le même outil en S2; quant à lui, le prototype 4 obtient des résultats non seulement plus stables, mais plus rapides, allant de 7,1 à 8,1 secondes (ce qui est intéressant puisque le dégagement constitue la principale étape d'une ouverture). Le protol et l'outil HQ présentent des résultats similaires entre eux, soit 16,6 et 18,0 secondes.

Enfin, la fermeture des grilles a été la plus rapide avec le protol (25,0 secondes en moyenne), ce qui pourrait s'expliquer par le fait que le bras rigide offre un meilleur contrôle à l'opérateur pour diriger la grille convenablement dans l'emboîtement du cadre. Toutefois, le prototype 4 en S2 et S3 suit de près avec une durée moyenne allant de 26,8 à 29,0 secondes. L'outil HQ quant à lui obtient 33,1 secondes, ce qui pourrait être dû à l'aspect encombrant du plateau qui ralentissait les opérateurs lors des essais. Le prototype 3 a requis 24,6 à 32,7 secondes pour la fermeture, cela en grande partie parce que le crochet se désolidarisait fréquemment du couvercle et devait être réinstallé (voir section 3.5.2).

3.5.2 Incidents

Quatre types d'incidents ont été analysés à partir des vidéos, tel que prévu dans la méthodologie. Il s'agit de :

- **Perte d'adhérence** (entre l'outil et le sol, plaçant l'opérateur en déséquilibre);
- **Sortie du crochet** (sortie spontanée pendant l'ouverture ou la fermeture);
- **Réinstallation du crochet** (suite à l'incident précédent ou par choix);
- **Autres incidents** (choc de l'opérateur contre l'outil ou contre un autre objet).

Le tableau 3.16 concerne les trois premiers types d'incidents survenus lors de la manipulation de tampons et indique le nombre moyen d'incidents par essai (obtenu en

divisant le nombre cumulatif d'occurrences par le nombre d'essais). Par exemple, le prototype 3 en position S1 a glissé en moyenne 2,00 fois par essai sur tampon, alors que le protol n'a glissé que 0,13 fois par essai. Pour les tampons, l'analyse de la variance montre que le choix de l'outil entraîne une variation statistiquement significative du nombre moyen d'incidents « perte d'adhérence » ($F_{7,63} = 5,867$, $p < .0001$). Le choix de l'outil joue aussi un rôle important pour ce qui est des incidents « sortie du crochet » ($F_{7,63} = 2,040$, $p < .064$) et « réinstallation du crochet » ($F_{7,63} = 1,992$, $p < .070$), puisque les résultats sont très près d'être statistiquement significatifs. Il est à noter toutefois que le fait de regrouper les outils sans distinction de sangle ne fournit pas plus de significativité.

Tableau 3.16 : Nombre moyen d'incidents par essai pour les tampons, selon l'outil

Outils	N Essais	Nombre moyen d'incidents par essai		
		Perte d'adhérence	Sortie du crochet	Réinstallation du crochet
Prototype 3 (S1)	9	2,00**	0,00	0,11
Prototype 3 (S2)	9	2,00**	0,00	0,11
Prototype 3 (S3)	12	1,58**	0,50	0,75
Protol	8	0,13**	0,00	0,13
Outil HQ	10	0,20**	0,00	0,00
Prototype 4 (S1)	8	0,25**	0,00	0,00
Prototype 4 (S2)	7	0,14**	0,00	0,00
Prototype 4 (S3)	8	0,38**	0,00	0,00
Total	71			

** $p < .01$.

Les résultats concernant les tampons montrent que le prototype 3 avait clairement un problème d'adhérence, puisque l'outil glissait au niveau du sol en moyenne 1,58 à 2,00 fois par essai. Les changements apportés au prototype 4 ont permis de résoudre en partie

ce problème, puisque la moyenne est passée à 0,14 glissement/essai (avec la sangle en S2), ce qui se compare avantageusement au protol (moyenne de 0,13) et à l'outil HQ (moyenne de 0,20). Pour ce qui est de l'incident « sortie du crochet », le prototype avec la sangle en S3 a connu ce problème en moyenne 0,50 fois par essai, contrairement à aucune fois pour les autres outils. De façon générale, la taille restreinte des trous d'ancrage de tampons empêche le crochet de se désolidariser, mais dans le cas du prototype 3 en S3, l'élévation du point de sortie de la sangle modifiait l'angle d'arrivée du crochet, le rendant moins bien ancré. Enfin, l'incident « réinstallation du crochet » a été le plus fréquent pour le prototype 3 en S3 (en toute logique, puisque pour cet outil le crochet était sorti le plus souvent). Le protol a aussi connu quelques occurrences (moyenne de 0,13), ce qui pourrait être dû au fait que le crochet est lié à un bras fixe, ce qui le rend beaucoup moins flexible et maniable, rendant nécessaire une réinstallation de celui-ci lorsque, par exemple, le tampon se coince dans son cadre pendant la fermeture.

En résumé, le prototype 4 avec la sangle en position S2 a connu le moins d'incidents lors des observations.

Le tableau 3.17 est identique au précédent, mais concerne les grilles. Ici, le nombre moyen d'incidents « perte d'adhérence » varie de façon statistiquement significative en fonction de l'outil employé ($F_{7,42} = 4,820$, $p < .0005$). L'incident « sortie du crochet » est quant à lui très près d'être significatif ($F_{7,42} = 2,074$, $p < .068$), mais si l'on regroupe les outils sans distinction de hauteur de sangle, alors l'effet « outil » confirme sa significativité statistique ($F_{3,46} = 4,905$, $p < .005$). Par contre, l'effet de l'outil sur l'incident « réinstallation du crochet » ne varie pas de façon statistiquement significative.

Tableau 3.17 : Nombre moyen d'incidents par essai pour les grilles, selon l'outil

Outils	N Essais	Ratio d'incidents		
		Perte d'adhérence	Sortie du crochet	Réinstallation du crochet
Prototype 3 (S1)	4	2,25**	1,25	1,50
Prototype 3 (S2)	5	0,60**	1,60	1,60
Prototype 3 (S3)	4	0,25**	1,00	1,75
Protol	7	0,42**	0,71	1,71
Outil HQ	7	0,00**	0,00	0,71
Prototype 4 (S1)	8	0,25**	0,13	1,13
Prototype 4 (S2)	7	0,00**	0,14	1,71
Prototype 4 (S3)	8	0,00**	0,13	0,88
Total	50			

** p<.01.

Comme le montre le tableau 3.17, l'incident « perte d'adhérence » avec les grilles a suivi la même tendance qu'avec les tampons, c'est-à-dire qu'il a été le plus fréquent avec le prototype 3 en S1 (2,25 glissements/essai), la fréquence de l'incident étant par ailleurs inversement proportionnelle à la hauteur de la sangle (ex. en S3 : 0,25 glissement/essai). Ce phénomène s'observe aussi, mais dans une moindre mesure, avec le prototype 4 (0,25 glissement/essai, uniquement en S1). Enfin, le prototype 4 en S2 et S3 et l'outil HQ n'ont eu aucune perte d'adhérence avec les grilles.

L'incident « sortie du crochet » a été beaucoup plus important avec les grilles qu'avec les tampons, puisque leurs rainures permettent aux crochets de glisser le long de celles-ci et, éventuellement, de se désolidariser plus facilement. Le prototype 3 a eu le plus d'incidents de ce type (1,00 à 1,60 sorties/essai), fort probablement à cause de la forme de son crochet mal adaptée aux grilles. Le protol a lui aussi connu des difficultés, avec une moyenne de 0,71 sortie/essai. D'après les séquences vidéo, ces événements se

produisaient principalement lors du dégagement quand l'opérateur reculait afin de repositionner l'outil. Le prototype 4 a obtenu des moyennes variant de 0,13 à 0,14, tandis que l'outil HQ n'a connu aucune sortie de crochet.

Enfin, il est difficile de tirer des conclusions à propos de la fréquence de l'incident « réinstallation du crochet » sur les grilles, puisque les résultats ne sont pas statistiquement significatifs et que la nature même des grilles, avec leur système d'emboîtement, rend leur fermeture délicate en forçant souvent l'opérateur à réinstaller le crochet sur le couvercle. Soulignons toutefois que le protol, l'outil habituel de la plupart des opérateurs rencontrés, n'obtient pas de meilleurs résultats que les autres dans ce cas (moyenne de 1,71 réinstallations/essai).

Pour ce qui est des incidents autres, deux événements ont été observés pendant les essais sur le prototype 3. Dans le premier cas, un opérateur de grande taille s'est cogné le genou sur le crochet d'appoint replié à l'arrière du manche. Dans le deuxième cas, une opératrice qui ouvrait un tampon a perdu l'équilibre lorsque le crochet est soudainement sorti du trou d'ancrage. Comme un poteau se trouvait à proximité, elle s'est cogné le bas du dos sur celui-ci. Ces deux incidents auraient pu causer des blessures étant donné la force et la vitesse d'impact, mais par chance ce ne fut pas le cas. Les séquences d'images vidéo illustrant ces deux incidents se trouvent à l'annexe 3.

3.5.3 Analyse biomécanique des postures

Afin d'estimer la contrainte biomécanique lors de la tâche d'ouverture, nous avons choisi des images représentatives du moment où la force requise par l'opérateur est maximale, c'est-à-dire lors du décollement de la plaque. Il arrive que les opérateurs adoptent des positions différentes, cependant le logiciel 3DSSPP ne permet pas de tenir compte des petites variations de posture.

La figure 3.2 montre un schéma des forces statiques en équilibre au moment du décolllement avec le protol. Un calcul a été effectué en supposant un couvercle de poids 100 kg et de diamètre 76 cm (voir l'annexe 4 pour le détail du calcul). Les hypothèses sont que le couvercle n'est pas coincé dans son cadre, que le coefficient de frottement statique entre le couvercle et le cadre est de 0,25 (acier contre acier) et que l'outil était en position verticale. Ces données permettent d'estimer la force requise au niveau du bras à 200 N (ou approximativement 100 N par bras, si l'opérateur utilise les deux).

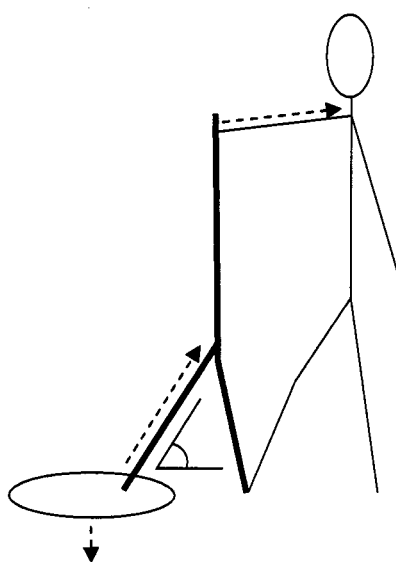


Figure 3.2 : Protol : équilibre des forces statiques au moment du décolllement

Toutefois, lors d'essais avec un dynamomètre, nous avons constaté, d'une part, que la force pouvait varier selon la position donnée à l'outil (verticale ou légèrement penchée vers l'avant) et que, d'autre part, toute accélération des bras faisant augmenter la force requise pour soulever et dégager le couvercle. Or, les 200 N proviennent d'un calcul de forces statiques, ce qui signifie que dans le cas réel (et donc dynamique), la force doit être supérieure puisque une certaine rapidité d'ouverture est atteinte. Les données recueillies à l'aide du dynamomètre ont montré que la force maximale, lors d'une ouverture très lente, variait entre 196 et 311 N avec le protol (en moyenne, 257 ± 58 N). Quant à eux, Chang et coll. (2003) ont trouvé, grâce à un transducteur installé sur un

protol et lors d'essais réels et donc dynamiques, une force maximale moyenne de 340 ± 87 N exercée par les bras lors de l'ouverture d'un couvercle de poids 104 kg et de diamètre 86 cm.

Puisque le logiciel 3DSSPP a été développé pour des calculs statiques et non dynamiques, l'analyse qui suit a été complétée en posant une force requise de 250 N pour le protol, c'est-à-dire les 200 N nécessaires en statique plus un facteur de sécurité pour tenir compte des variations possibles de la position de l'outil. Les résultats ont été calculés pour un homme nord-américain moyen (taille : 1,77 m et poids : 75,2 kg) et une femme nord-américaine moyenne (taille : 1,62 m et poids : 62,5 kg) et mis en rapport avec des distributions de force musculaire dans une population de travailleurs en santé, ce qui a permis d'estimer la proportion de ceux-ci ayant la force requise pour réaliser la tâche modélisée.

La figure 3.3 montre l'ouverture d'un tampon avec le protol, où l'opérateur a choisi de n'utiliser qu'un seul bras. Le tableau 3.18 présente les résultats de l'analyse biomécanique effectuée avec 3DSSPP, après cette image ait été modélisée.

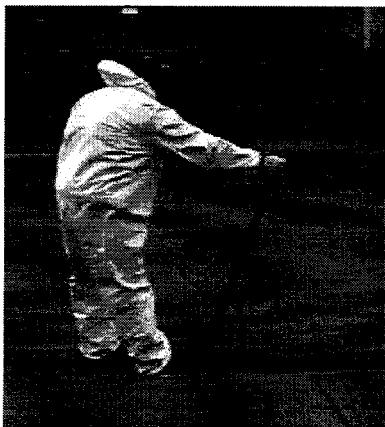


Figure 3.3 : Ouverture à un bras avec le protol

Tableau 3.18 : Analyse biomécanique de la figure 3.3 (protol, ouverture à 1 bras)

Articulation	Proportion de la population capable (%)	
	Homme 50 ^e centile	Femme 50 ^e centile
Coude	100	100
Épaule	96	68
Tronc	97	89
Hanche	82	45
Compression en L ₅ /S ₁ (N) (moyenne et écart-type)	1588 ± 123	1459 ± 116

Les résultats indiquent que lors de l'utilisation du protol avec un bras, la région la plus sollicitée est la hanche, puisque seulement 82% de la population masculine industrielle en bonne santé est capable de fournir l'effort nécessaire dans cette position, et seulement 45% chez les femmes. Toujours chez les femmes, l'épaule est aussi particulièrement sollicitée avec seulement 68% d'individus capables. Pour ce qui est de la compression lombaire en L₅/S₁, les valeurs trouvées sont en dessous de 3,4 kN, la valeur seuil pour une bonne conception selon le NIOSH (1981).

Le protol toutefois est généralement employé avec les deux bras, comme illustré à la figure 3.4. L'analyse de cette image est présentée au tableau 3.19.

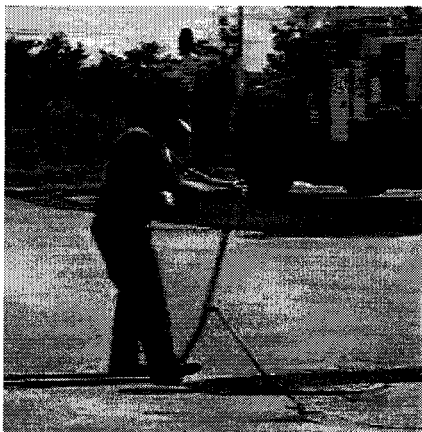
**Figure 3.4 : Ouverture à deux bras avec le protol**

Tableau 3.19 : Analyse biomécanique de la figure 3.4 (protol, ouverture à 2 bras)

Articulation	Proportion de la population capable (%)	
	Homme 50 ^e centile	Femme 50 ^e centile
Coude	100	99
Épaule	98	74
Tronc	98	97
Hanche	87	71
Compression en L ₅ /S ₁ (N) (moyenne et écart-type)	1336 ± 103	1158 ± 92

Ces résultats montrent que pour le protol, une plus grande proportion de la population est en mesure d'effectuer la tâche en ayant recours à deux bras plutôt qu'un seul. Cependant, la hanche est l'articulation où l'on observe la plus grande limitation (seulement 87% des hommes et 71% des femmes capables). L'épaule est aussi sollicitée chez les femmes avec 74% d'individus capables.

À titre de comparaison, Imbeau et coll. (2003), qui ont aussi modélisé l'ouverture d'un couvercle de 100 kg avec un protol, trouvent une force de compression résultante en L₅/S₁ de 1088 ± 70 N (population masculine uniquement).

Le prototype 3 a fait l'objet de la même analyse; toutefois, étant donné que l'outil est plus long et dispose donc d'un plus grand ratio de bras de levier (voir explication à la section 3.4.4), la force requise au niveau des bras a été ajustée en conséquence à 200 N (réduction de 20% en supposant la sangle à S2), en se basant sur le calcul de l'annexe 4. La figure 3.5 illustre une ouverture avec le prototype 3 et le tableau 3.20 présente les résultats de l'analyse.



Figure 3.5 : Ouverture avec le prototype 3

Tableau 3.20 : Analyse biomécanique de la figure 3.5 (prototype 3)

Articulation	Proportion de la population capable (%)	
	Homme 50 ^e centile	Femme 50 ^e centile
Coude	100	99
Épaule	99	96
Tronc	98	95
Hanche	81	57
Compression en L ₅ /S ₁ (N) (moyenne et écart-type)	1409 ± 108	1230 ± 97

Ces résultats montrent que la hanche est l'articulation la plus sollicitée; seulement 81% des hommes et 57% des femmes sont en mesure de fournir cet effort. Pour les femmes, l'épaule n'est pas autant sollicitée qu'avec le protol, mais la compression en L₅/S₁ atteint un niveau légèrement plus élevé.

Pour ce qui est de l'outil HQ, illustré à la figure 3.6, la différence de bras de levier réduit la force requise au niveau des bras à 180 N (réduction de 28%). Le tableau 3.21 présente les résultats de l'analyse.



Figure 3.6 : Ouverture avec l'outil HQ

Tableau 3.21 : Analyse biomécanique de la figure 3.6 (outil HQ)

Articulation	Proportion de la population capable (%)	
	Homme 50 ^e centile	Femme 50 ^e centile
Coude	100	99
Épaule	99	95
Tronc	97	92
Hanche	89	74
Compression en L ₅ /S ₁ (N) (moyenne et écart-type)	1656 ± 127	1521 ± 119

Ces résultats montrent qu'une assez grande proportion de la population masculine est en mesure de fournir l'effort requis avec l'outil HQ, mais ici aussi, la hanche est l'articulation où l'on observe la plus grande limitation (89% des hommes et seulement 74% des femmes capables). Chez les femmes, l'épaule semble aussi moins sollicitée qu'avec le protol, mais la compression en L₅/S₁ atteint un niveau plus élevé.

Le prototype 4, illustré à la figure 3.7, possède également une différence de bras de levier qui fait passer la force requise au niveau des bras à 215 N (réduction de 14 %). Les résultats de l'analyse se trouvent au tableau 3.22.



Figure 3.7 : Ouverture avec le prototype 4

Tableau 3.22 : Analyse biomécanique de la figure 3.7 (prototype 4)

Articulation	Proportion de la population capable (%)	
	Homme 50 ^e centile	Femme 50 ^e centile
Coude	100	100
Épaule	99	91
Tronc	99	98
Hanche	95	72
Compression en L ₅ /S ₁ (N) (moyenne et écart-type)	871 ± 60	752 ± 55

Selon les résultats, le prototype 4 est l'outil qui permet d'accommoder la plus grande proportion de la population masculine (95% ou plus, selon l'articulation). La population féminine éprouve plus de difficulté au niveau de la hanche avec seulement 72% d'accommodation. On observe que la force de compression en L₅/S₁ est la moins élevée avec cet outil qu'avec les autres. Ceci est dû à la différence de position des mains qui se trouvent vis-à-vis les épaules, et non au centre du corps.

3.5.4 Autres observations

Les vidéos ont permis de faire deux observations sur la posture de travail des opérateurs avec le prototype 4 (voir photos, figure 3.8). La première concerne le moment où

l'opérateur installe le crochet sur le couvercle: il doit à la fois maintenir appuyé le bouton de la sangle à cliquet et apposer le crochet sur le couvercle, tout en soutenant l'outil. Cette position a été jugée inconfortable par plusieurs opérateurs. La deuxième a trait à la position du pied sur le mors : pour les individus de petite taille, l'épaisseur du mors les force à ne s'appuyer que sur le bout du pied.

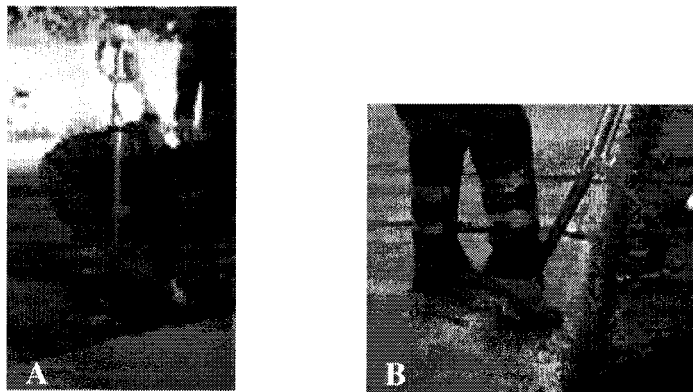


Figure 3.8 : Prototype 4 : (a) installation du crochet et (b) position du pied

3.6 Résultats du questionnaire 2

3.6.1 Score de l'outil quant aux 13 qualités recherchées

Les opérateurs pouvaient, selon l'outil testé, se prononcer « tout à fait d'accord », « d'accord », « plus ou moins d'accord » ou « pas d'accord » avec chacun des 13 énoncés concernant des qualités généralement recherchées pour un outil de levage de couvercles. Le tableau 3.23 présente les résultats pour chaque outil, sous la forme du pourcentage d'opérateurs s'étant affirmés « tout à fait d'accord » ou « d'accord » avec chaque qualité. Par exemple, seulement 55% des opérateurs étaient d'accord avec le fait que le prototype 3 était facile à contrôler pendant l'activité, mais ce pourcentage est passé à 89% avec le prototype 4. Les pourcentages obtenus varient de façon statistiquement significative, selon l'outil, pour la qualité n° 9 « léger » ($\chi^2_{3,28}=19,13$, $p<0.0003$) et de façon presque significative pour la qualité n° 12 « bonne adhérence au sol » ($\chi^2_{3,28}=6,44$, $p<0.092$).

Tableau 3.23 : Proportion d'opérateurs s'affirmant d'accord avec les 13 qualités

Qualités de l'outil	Pourcentage d'opérateurs d'accord			
	Prototype 3	Protol	Outil HQ	Prototype 4
	N = 9	N = 7	N = 7	N = 9
1. Facile à contrôler pendant l'activité	55	71	71	89
2. Sécuritaire	55	71	100	77
3. Bonne prise dans la main	89	86	100	100
4. Facile à installer sur le couvercle	89	71	43	44
5. Reste bien agrippé sur le couvercle pendant le levage	56	86	100	78
6. Facile à désinstaller du couvercle	89	86	57	89
7. Peut aider à décoller un couvercle encrassé ou gelé	50	43	43	ND ^a
8. Permet d'accomplir toutes les opérations, du début à la fin	67	43	57	67
9. Léger	22*	100*	86*	100*
10. Pratique à ranger	67	100	100	75
11. Permet d'ouvrir et fermer tous les types de couvercles	56	43	29	77
12. Bonne adhérence au sol	44	57	100	78
13. Permet d'ouvrir et fermer un couvercle sans forcer	89	71	86	89

*p<.05.

^a Cinq des neuf opérateurs ne se sont pas prononcés sur cette question, car ils n'avaient pas rencontré ces conditions. Les quatre autres ont affirmé être d'accord.

D'après les opérateurs interrogés, le prototype 4 est l'outil le plus facile à contrôler (89% d'accord avec la qualité n° 1); une des raisons mentionnées était la présence de la double poignée. L'outil jugé le plus sécuritaire est l'outil HQ (100% d'accord), suivi du prototype 4 (77% d'accord). La qualité n° 2 « sécuritaire » est toutefois difficile à définir, car elle fait appel à un ensemble de paramètres que l'opérateur associe à un sentiment de sécurité. Par exemple, un outil robuste, dont les parties saillantes ou mobiles sont protégées, qui comporte un système d'absorption d'énergie (tel un système sangle-ressort plutôt qu'un bras rigide comme le protol) et dont le comportement n'est pas imprévisible (par ex. dont le crochet ne se désolidarise pas spontanément du couvercle) peut sembler plus « sécuritaire ».

Tous les outils ont de bons résultats pour la qualité n° 3 « bonne prise dans la main », outil HQ (100%) et prototype 4 (100%) en tête. Le prototype 3 a été jugé le plus facile à installer sur le couvercle (89% d'accord), puisque c'est celui qui requiert de se pencher le moins. Logiquement, l'outil HQ et le prototype 4 ont le même faible résultat (43 et 44%), puisqu'ils sont munis d'un crochet presque identique, qui en certaines occasions ne s'insérait pas bien (et une fois pas du tout) dans les petits trous d'ancrage de tampons de diamètre circulaire de 3,2 cm (1 ¼ po). La qualité n° 5 « reste bien agrippé sur le couvercle pendant le levage » a été le mieux rencontrée par l'outil HQ (100% d'accord), qui n'a effectivement connu aucun incident de type « sortie du crochet » pendant les essais (voir section 3.5.2). Le prototype 3 a reçu la plus faible note à cet égard (56% d'accord). La qualité n° 6 « facile à désinstaller du couvercle » est bien atteinte par les prototypes 3 et 4 (89% d'accord dans les deux cas).

Pour ce qui est de la qualité n° 7 « peut aider à décoller un couvercle encrassé ou gelé », les résultats sont faibles pour les prototype 3 (50%), protol (43%) et outil HQ (43%), car, selon les opérateurs, seul un coup de masse peut venir à bout d'un couvercle pris par la glace, tandis que cela peut également être nécessaire s'il est très encrassé. Pour sa part, le prototype 4 n'apporte aucune amélioration de ce point de vue.

L'outil HQ obtient une note faible (57%) pour la qualité n° 8 « permet d'accomplir toutes les opérations, du début à la fin », entre autres parce que cet outil ne possède pas d'embout spécifiquement conçu pour le nettoyage du cadre, contrairement au prototype 4 (67% d'accord). Il est à noter que le protol, malgré un embout de ce type, obtient la note la plus faible (43%), ce qui pourrait être dû au fait que la fermeture doit se faire en davantage d'étapes, vu la restriction de mouvement imposée par la longueur fixe du bras rigide. Il est aussi possible que ce soit parce que le bras articulé se balance en tous sens lorsque vient le temps de nettoyer un cadre, à moins de l'avoir inséré au préalable dans la pince prévue pour le retenir, ce qui est une opération non nécessaire avec les prototypes 3 et 4 puisque le mécanisme à ressort stabilise le crochet.

Il est intéressant de souligner que le poids respectif des outils suit assez bien les notes accordées par les opérateurs pour la qualité n° 9 « léger ». En effet, le prototype 3 pèse 7,45 kg et reçoit la plus mauvaise note (22%), l'outil HQ pèse 5,54 kg et reçoit une note de 86% tandis que le protol pèse 4,90 kg et reçoit un avis favorable à 100%. Pour sa part, malgré que le prototype 4 pèse 5,86 kg, il reçoit une note de 100%. À notre avis, ceci est dû à l'effet de la double poignée qui rend l'outil plus facilement manipulable à deux mains, donnant ainsi une impression accrue de légèreté. Le protol et l'outil HQ obtiennent des résultats unanimes (100%) pour la qualité n° 10 « pratique à ranger ».

Le prototype 4 obtient la meilleure note (77%) pour la qualité n° 11 « permet d'ouvrir et de fermer tous les types de couvercles », tandis que le protol n'obtient que 43% d'avis favorables. Dans ce cas, le principal avantage du prototype 4 par rapport au protol pourrait résider dans sa plus grande flexibilité grâce à la sangle; par exemple, un opérateur peut facilement s'éloigner du puits d'accès en se plaçant sur le trottoir pour refermer une grille avec le prototype 4, ce qui n'est pas le cas avec le protol.

Enfin, la qualité n° 12 « bonne adhérence au sol » est la mieux atteinte par l'outil HQ (100%), et le moins bien par le prototype 3 (44%), ce qui est conséquent avec le nombre

d'incidents de type « perte d'adhérence » observés pendant les essais. Malgré que le mors du prototype 4 et du protol soient presque identiques, les résultats diffèrent (78% pour le prototype 4 et 57% pour le protol); encore une fois, la plus grande flexibilité du prototype 4 grâce à son système de sangle pourrait être à l'origine d'un meilleur positionnement initial de l'opérateur, et donc d'un risque plus faible de perte d'adhérence. Quant à elle, la qualité n° 13 « permet d'ouvrir et fermer un couvercle sans forcer » recueille des avis majoritairement favorables pour l'outil HQ (86%) et les prototype 3 et 4 (89% dans les deux cas), tandis que le protol décroche 71%, ce qui pourrait être lié au fait que l'avantage mécanique (effet de bras de levier) est plus petit, puisque son manche est plus court.

3.6.2 Les 3 qualités les plus importantes

Parmi les treize qualités mentionnées, les opérateurs devaient ensuite indiquer les trois qu'ils jugeaient les plus importantes, en ordre de priorité, pour l'ouverture et la fermeture d'un couvercle. Les avis de 18 opérateurs ont ainsi été recueillis et sont compilés au tableau 3.24. Le nombre de voix exprimées a été comptabilisé dans les trois premières colonnes; par exemple, la qualité « facile à contrôler pendant l'activité » était la plus importante (colonne « Q1 », pour « qualité 1 ») pour un opérateur, la deuxième plus importante (Q2) pour quatre opérateurs et la troisième plus importante pour deux opérateurs (Q3).

Afin de tenir compte de l'ordre d'importance des qualités, l'importance relative pondérée de chacune des qualités a été calculée selon la méthode proposée par Akao (1990)⁵ et est donnée à la dernière colonne du tableau. Ce calcul est une pondération obtenue en multipliant par 9 points la colonne Q1, 3 points la colonne Q2 et 1 point la colonne Q3. Le résultat est ensuite divisé par la somme des points et multiplié par 100.

⁵ Il s'agit des indices d'importance pour le consommateur.

Tableau 3.24 : Ordre d'importance des 13 qualités et importance relative pondérée

Qualités de l'outil	Ordre d'importance (nombre de voix)			Importance relative pondérée (%)
	Q1	Q2	Q3	
1. Facile à contrôler pendant l'activité	1	4	2	9,9
2. Sécuritaire	4	2	1	18,5
3. Bonne prise dans la main		1		1,3
4. Facile à installer sur le couvercle		1	4	3,0
5. Reste bien agrippé sur le couvercle pendant le levage		2	1	3,0
6. Facile à désinstaller du couvercle				0,0
7. Peut aider à décoller un couvercle encrassé ou gelé			1	0,4
8. Permet d'accomplir toutes les opérations, du début à la fin			3	1,3
9. Léger	4	2		18,0
10. Pratique à ranger		1	1	1,7
11. Permet d'ouvrir et fermer tous les types de couvercles		1		1,3
12. Bonne adhérence au sol	6	1	2	25,3
13. Permet d'ouvrir et fermer un couvercle sans forcer	3	3	2	16,3
Total	18	18	17*	100,0

Note : Un opérateur n'a pas nommé de qualité en troisième position.

Le tableau 3.24 permet de constater que cinq qualités se démarquent particulièrement et revêtent donc une grande importance aux yeux des opérateurs. Il s'agit de :

- Qualité n° 12 « bonne adhérence au sol » (25,3% du poids relatif);
- Qualité n° 2 « sécuritaire » (18,5%);
- Qualité n° 9 « léger » (18,0%);
- Qualité n° 13 « permet d'ouvrir et fermer un couvercle sans forcer » (16,3%);
- Qualité n° 1 « facile à contrôler pendant l'activité » (9,9%).

3.6.3 Commentaires généraux des opérateurs

Tous les commentaires des opérateurs ont été notés avant, pendant et après les essais. Ils ont été regroupés par outil et les principaux sont présentés dans les tableaux suivants.

Tableau 3.25 : Commentaires des opérateurs sur le prototype 3

Commentaires positifs	Commentaires négatifs
« L'outil permet de ne pas trop forcer avec le dos »	« L'adhérence du mors au sol est mauvaise »
« Le mécanisme sangle/ressort est protégé (par opposition à celui de l'outil HQ) »	« L'outil est trop lourd »
« C'est plus facile lorsque la sangle est plus basse (S1) »	« L'outil requiert de nombreuses manipulations, il est compliqué »
« Le crochet rigide peut aider à décoller un couvercle encrassé ou gelé »	« C'est plus rapide avec un pic »
	« Le crochet sort parfois du trou d'ancrage (tampons) ou des rainures (grilles) »
	« La sangle est trop courte et limite la distance opérateur/couvercle »
	« L'étrier est inconfortable parce qu'il s'appuie sur le haut du pied »

Tableau 3.26 : Commentaires des opérateurs sur le protol

Commentaires positifs	Commentaires négatifs
« Le protol est rapide à utiliser »	« L'ouverture est plus forçante »
« Le bras rigide offre un meilleur contrôle pour fermer une grille à emboîtement »	« Il faut se pencher beaucoup pour désinstaller le crochet d'un tampon »
« Le bras rigide du protol permet parfois d'installer le crochet sur une grille presque sans se pencher »	« Le bras rigide du protol fait en sorte que c'est le dos qui prend le coup si le couvercle reste coincé »
« L'outil est léger »	« Le bras rigide empêche de se positionner où l'on veut, ce qui est contrariant si le couvercle est sur-élevé ou juxtaposé à la contremarche d'un trottoir »
	« Dès que le mors est usé, il faut changer l'outil au complet »

Tableau 3.27 : Commentaires des opérateurs sur l'outil HQ

Commentaires positifs	Commentaires négatifs
« L'ouverture est moins forçante »	« Le plateau est encombrant »
« Le crochet est bien adapté aux rainures des grilles »	« L'ouverture est plus lente avec cet outil »
« La grande longueur de la sangle permet de se positionner où l'on veut »	« Le crochet reste parfois pris entre le couvercle et le cadre lors de la fermeture »
« Excellente adhérence sur l'asphalte »	« Adhérence moins bonne sur le béton »
« L'outil est léger »	

Tableau 3.28 : Commentaires des opérateurs sur le prototype 4

Commentaires positifs	Commentaires négatifs
« La double poignée rend l'outil maniable et l'ouverture moins forçante »	« Moins bonne adhérence sur le béton »
« Bonne adhérence sur l'asphalte »	« C'est difficile de tenir le bouton enfoncé tout en installant le crochet »
« La double poignée et l'embout pour nettoyer rendent cette tâche facile »	« Le crochet ne rentre pas dans les petits trous d'ancrage de tampons »
« L'outil est assez léger »	« L'outil est instable ; le mors est un peu désaxé par rapport au manche de l'outil »

CHAPITRE 4 : DISCUSSION

Ce chapitre de discussion présente d'abord une synthèse des résultats conformément aux questions de recherche. Une section précède toutefois les résultats du prototype 4, afin d'exposer les éléments de décision ayant mené à l'élaboration de celui-ci. Ensuite, des recommandations sont formulées pour l'amélioration du dernier prototype et les améliorations que celui-ci apportera aux outils existants sont examinées. Enfin, une réflexion est faite sur la contribution et les limites de l'étude.

4.1 Prototype 1

Les résultats obtenus avec le prototype 1 (voir photo, figure 2.2) ont permis de valider le principe général de l'outil proposé par le fabricant, c'est-à-dire un outil permettant à l'opérateur de maintenir une position debout lors de l'effort, avec le dos droit. De plus, le système de la sangle à cliquet a montré des avantages intéressants, tel celui de l'économie de mouvements lors du déplacement d'un couvercle vers soi. Toutefois, la mauvaise adhérence au sol du prototype 1 a restreint le nombre d'essais sur le terrain, puisque la sécurité des opérateurs était mise en jeu. En effet, l'adhérence se rompait généralement au moment où l'opérateur appliquait l'effort nécessaire au soulèvement de la plaque, ce qui constitue l'étape où la force de lever est maximale (Doit et Aptel, 1993). Or, les recherches de Lavender et coll. (1989) ont montré que lorsque un effort doit être réalisé de façon imprévue, la sollicitation musculaire résultante est significativement plus élevée que celle requise dans des conditions statiques. Cette augmentation peut même atteindre les 99% si l'effort est non seulement imprévu mais asymétrique. Dans le cas du prototype 1, le problème d'adhérence au sol le rendait

« imprévisible » et l'effort était généralement asymétrique, car souvent exercé à une seule main.

4.2 Prototype 2

Deux améliorations ont été apportées à la deuxième génération du prototype (voir photo, figure 2.3) concernant son adhérence au sol : d'abord, un nouveau type de mors a été posé. Ensuite, la hauteur du point de sortie de la sangle a été rendue ajustable selon trois niveaux, pour vérifier l'hypothèse selon laquelle cette hauteur pourrait avoir une influence sur l'adhérence de l'outil, mais aussi sur l'effort de l'opérateur. Cependant, le prototype 2 s'est cassé lors des premiers essais sur le terrain et a été immédiatement remplacé par le prototype 3, quasiment identique. Les résultats des prototypes 2 et 3 ont donc été agrégés lors de l'analyse des résultats.

4.3 Prototype 3

Les essais sur le prototype 3 (voir photo, figure 2.4) ont permis, dans un premier temps, de confirmer que la hauteur de la sangle avait un effet sur l'adhérence au sol de l'outil : le nombre d'incidents « perte d'adhérence au sol », relevés à l'aide des enregistrements vidéos des ouvertures et fermetures de tampons et grilles, était moins élevé lorsque la sangle était en position haute (S3). Ceci est dû au fait que plus la sangle est haute, plus elle permet de soulever verticalement le couvercle ; comme le montre la figure 4.1, la composante en y du poids du couvercle est alors reprise par l'outil et appliquée au point de contact entre le mors et le sol, améliorant ainsi l'adhérence. De plus, lorsque la sangle est basse (S1), le pied de l'opérateur doit appuyer plus fort sur le mors afin de contrecarrer le moment induit par la force de ses bras, fourni pour dégager le couvercle. Cet effort au niveau du pied induit une composante horizontale qui s'ajoute à celle

induite par le couvercle, contribuant ainsi à une réduction de l'adhérence, puisque le pied du travailleur peut en quelque sorte pousser vers l'avant le mors de l'outil au moment du déploiement de l'effort. Il devient alors difficile pour l'opérateur de garder le contrôle sur l'outil et les chances d'une perte d'adhérence se trouvent accrues.

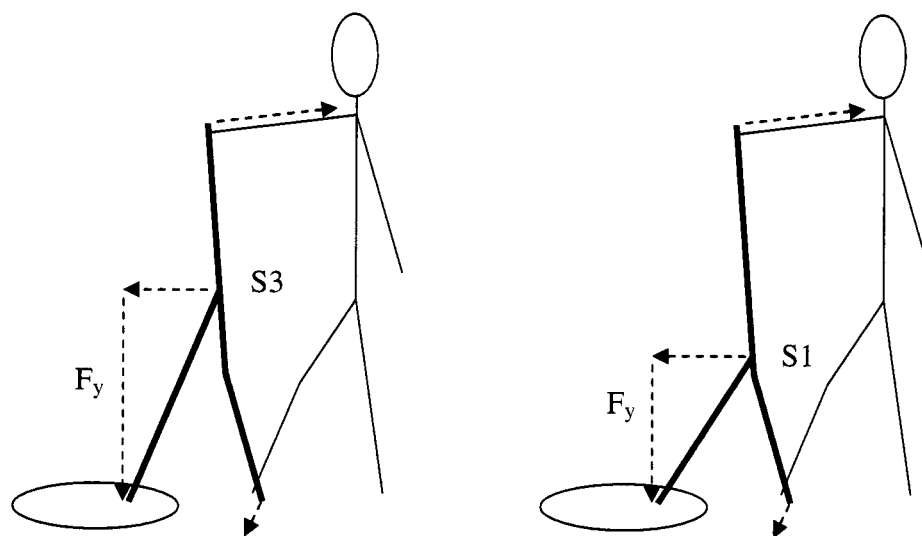


Figure 4.1 : Composante verticale de la force (F_y) avec le prototype 3 en S3 et S1

Dans un deuxième temps, l'influence de la hauteur de la sangle a aussi été observée sur l'effort perçu par l'opérateur : les mesures subjectives de force, obtenues avec l'échelle de Borg, montrent que l'effort a tendance à croître avec l'augmentation de la hauteur de la sangle. Ceci s'explique par le fait que plus la sangle est haute, plus le bras de levier de l'outil est petit, puisque la longueur résultante du manche est plus courte. L'avantage mécanique (effet de bras de levier) offert à l'opérateur s'en trouve donc réduit, tel que schématisé à la figure 4.2.

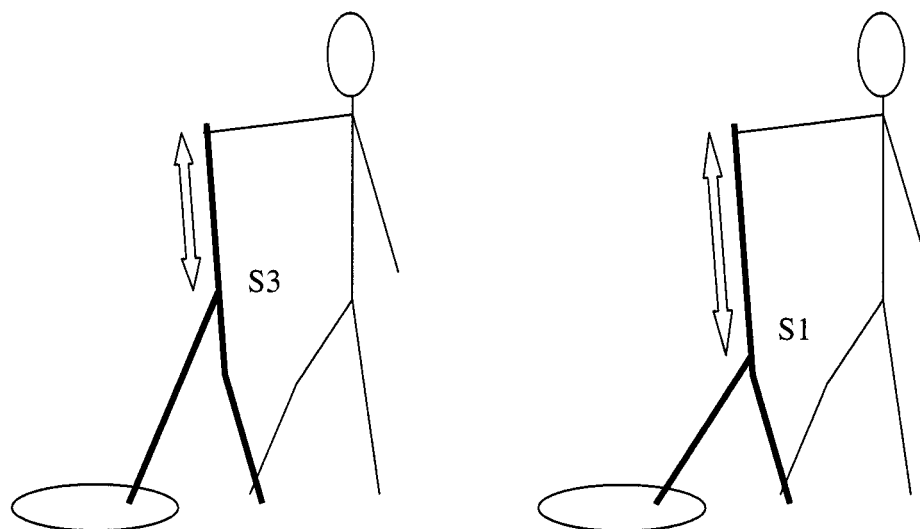


Figure 4.2 : Longueur du bras de levier (flèche) du prototype 3 en S3 et en S1

Les deux qualités recherchées ici, soit adhérence au sol et avantage mécanique, s'opposent en quelque sorte, rendant nécessaire un compromis quant à la hauteur de la sangle.

Par ailleurs, les analyses biomécaniques qui ont été faites sur les images tirées de l'utilisation du prototype 3 indiquent que la force de compression résultante en L₅/S₁ se trouve sous la valeur seuil pour une bonne conception de 3,4 kN (NIOSH, 1981). Toutefois, les exigences au niveau musculaire dépassent les capacités d'une grande partie de la population industrielle en santé, puisque seulement 81% des hommes et 57% des femmes sont capables de fournir l'effort requis à l'articulation de la hanche. Or, Putz-Anderson (1988) recommande que toute tâche requérant plus de 50% de la capacité musculaire d'un travailleur soit éliminée ou modifiée, car elle représente un risque de blessure musculo-squelettique, entre autres à cause de l'absence de réserve de capacité musculaire. Or, si l'on considère que nos calculs biomécaniques ont été faits dans le cas d'un effort isolé, il devient peu réaliste d'espérer que 81% des hommes et 57% des

femmes seront même capables de fournir l'effort nécessaire, tout au long d'une journée de travail. Les proportions d'individus capables seront alors forcément plus petites.

Qui plus est, la norme européenne EN-1005-3 sur les limites de forces recommandées pour l'utilisation de machines recommande que le design de toute tâche physique soit fait en considérant la force du 15^e centile de la population adulte. Ces limites visent à réduire les phénomènes dangereux pour au moins 85% de la population des utilisateurs professionnels prévus. Ainsi, pour une activité de traction, en posture debout optimale, la force maximale recommandée est de 145 N. À cette valeur, il faut toutefois appliquer une série de coefficients qui ont pour effet de la réduire significativement pour la rendre acceptable d'un point de vue design en tenant compte par exemple de la vitesse, de la fréquence et de la durée de l'activité. En définitive, la force maximale acceptable se trouve donc inférieure à celle du 15^e centile. Or, nos résultats montrent que la tâche n'est pas acceptable selon la norme EN-1005-3 puisque, pour un effort isolé, la proportion d'individus capables est déjà inférieure à 85%, chez les hommes et les femmes.

De façon générale, les essais sur le prototype 3 ont permis de constater que l'outil, bien qu'ayant un concept prometteur, avait des lacunes importantes à corriger, telles :

- Poids de l'outil (7,45 kg) considéré lourd par 78% opérateurs interrogés;
- Mauvaise adhérence au sol (l'outil glissait jusqu'à 2 fois/essai);
- Forme du crochet inadéquate (se désolidarisait jusqu'à 1,6 fois/essai sur grille);
- Forme de l'étrier inconfortable : le haut du pied s'appuyant sur celui-ci;
- Outil trop haut (1,44 m) s'approchant du menton de certains individus plus petits;
- Sangle trop raide et donc difficile à manier;
- Force requise trop élevée pour un design sécuritaire selon EN-1005-3 (2002).

4.4 Protol

Le protol (voir photo, figure 2.5) est un outil répandu, principalement auprès des égoutiers, qui offre certaines caractéristiques intéressantes, tel un poids (4,90 kg) considéré léger par l'ensemble des opérateurs rencontrés et une relative simplicité d'utilisation. Même si, lors des essais, cet outil permettait d'accomplir l'ouverture des tampons environ 30% plus rapidement que le prototype 3, cet avantage n'est vraisemblablement dû qu'à l'expérience de travail des opérateurs, qui dans la majorité des cas utilisent cet outil quotidiennement.

L'intérêt de comparer le protol aux prototypes résidait plutôt dans les aspects du design et de la posture. Certes, le protol représente une avancée par rapport à ses prédécesseurs les pics et crochets, mais d'après les observations effectuées, il pose encore quelques risques à la sécurité musculo-squelettique de ses utilisateurs. En premier lieu, les analyses biomécaniques effectuées ont montré que seulement 87% des hommes et 71% des femmes faisant partie de la population industrielle en bonne santé avaient tout juste la force requise, à l'articulation de la hanche, pour effectuer la tâche de levage avec cet outil. Ce pourcentage était de 74% pour l'épaule chez les femmes. Or, comme mentionné pour le prototype 3 (voir section 4.3), ces pourcentages concernent un effort isolé et sont donc surestimés si l'on se fie aux bonnes pratiques de design qui recommandent de ne pas dépasser la force du 15^e centile de la population (EN-1005-3, 2002).

En deuxième lieu, il existe un risque de blessure aux membres supérieurs dû au lien rigide (bras articulé) qui relie le couvercle à l'opérateur. L'opérateur qui ignore qu'un couvercle est complètement coincé parce qu'il est gelé ou très encrassé et qui exerce un effort dans le but de le dégager peut se blesser en raison d'une trop forte intensité de l'effort. Même dans le cas où le couvercle cède, l'intensité de l'effort initial nécessaire au décollement peut être supérieur de près de 50% à celui nécessaire pour décoller une plaque d'égout nettoyée, comme l'ont constaté Doit et Aptel (1993).

Ainsi, malgré que l'étude de Chang et coll. (2003) ait indiqué que l'ouverture d'un tampon de 104 kg avec le protol engendrait une contrainte lombaire de compression de 2,3 kN en moyenne, et ne dépassait donc pas la valeur seuil de 3,4 kN établie par le NIOSH (1981), il reste que ces observations ont été faites uniquement sur des plaques nettoyées, c'est-à-dire non encrassées. Cela laisse donc présager que sur le terrain, certaines ouvertures pourraient dépasser cette limite.

À ce sujet, un des avantages des prototypes évalués ici est leur système de sangle à cliquet, remplaçant le bras rigide articulé du protol. Grâce à l'élasticité de la sangle, ce système peut jouer un rôle d'absorption d'énergie dans le cas particulier où le couvercle est complètement coincé, protégeant ainsi partiellement le dos et/ou les épaules de l'opérateur. Toutefois, cet atout ne doit pas amener l'opérateur à négliger le coup de masse nécessaire au descellement du couvercle, qui est essentiel, comme le rapportent Doit et Aptel (1993) : « l'encrassement de la plaque d'égout et de son cadre augmente significativement l'effort de décollement. Ce phénomène [...] renforce, si besoin est, l'importance du respect des consignes, qui stipulent qu'il faut frapper la plaque d'égout avant tout effort de lever » (p. 458).

La présence d'un bras rigide sur le protol a aussi des conséquences sur le mode opératoire de l'activité. Le nombre moyen d'occurrences de repositionnements de l'outil lors du tirage (ou dégagement) d'un couvercle varie de 3 à 4 par ouverture avec le protol, selon les observations de Imbeau et coll. (2003). Ceci s'explique par le fait que la longueur du bras rigide limite la distance sur laquelle l'opérateur peut reculer, l'obligeant ainsi à répéter le mouvement plusieurs fois pour entièrement dégager le puits d'accès.

Cette limitation se répète lors de la fermeture : l'opérateur doit alors tirer plusieurs fois le couvercle en faisant partiellement le tour du puits d'accès, très près de celui-ci, ce qui n'est pas sans risque lorsque, par exemple, le sol est glissant. Si le couvercle se trouve le

long d'un trottoir (c'est habituellement le cas pour les grilles), la fermeture avec un protol peut devenir particulièrement contrariante, puisque l'opérateur doit appuyer le mors du protol sur le trottoir tout en se penchant assez vers l'avant pour que le crochet reste inséré dans le couvercle. Ceci est attesté par le fait que 50% des opérateurs interrogés ont jugé le protol mal adapté à la fermeture d'une grille. Pourtant, certains opérateurs ont aussi rapporté que ce bras rigide avait des avantages, comme celui de permettre un meilleur contrôle de l'orientation de la grille dans son système d'emboîtement pendant la phase finale de la fermeture.

Enfin, les mesures subjectives de force visant à évaluer l'effort perçu par les opérateurs lors de l'ouverture d'un tampon ont montré que le protol obtenait un résultat équivalent au prototype 3 (moyenne d'approximativement 2 sur l'échelle de Borg dans les deux cas), malgré les problèmes d'adhérence au sol de ce dernier. De plus, près de 30% des opérateurs interrogés ont affirmé que le protol ne permettait pas d'ouvrir et fermer un couvercle sans forcer. L'examen de l'outil permet de constater que la hauteur de l'outil (1,19 m) est plus petite que celle du prototype 3 (1,44 m) et procure effectivement un avantage mécanique plus restreint à l'utilisateur. Même s'il est théoriquement possible de modifier la hauteur de sortie du bras articulé selon 4 niveaux, en pratique c'est toujours le même niveau qui est utilisé, parce que sinon le bras dépasse du bas de l'outil ou ne peut plus être immobilisé par la pince prévue à cet effet.

En résumé, les inconvénients du protol sont principalement les suivants :

- Force requise trop élevée pour respecter la norme EN-1005-3 (2002);
- Risque pour les membres supérieurs dû au lien rigide reliant l'outil au couvercle;
- Nombre élevé d'occurrences de repositionnements (3 à 4/essai) lors du tirage;
- Nécessité de faire le tour du puits d'accès pour refermer un couvercle;
- Avantage mécanique restreint dû à la hauteur réduite (1,19 m) de l'outil;
- Hauteur du bras articulé ajustable en théorie seulement.

4.5 Outil HQ

L'outil HQ est fabriqué à l'interne par Hydro-Québec, pour ses opérateurs, et n'est pas destiné à la vente externe (voir photo, figure 2.6). Il n'en demeure pas moins qu'il est connu des gens du milieu, ne serait-ce que par le fait que les employés municipaux des égouts et aqueduc partagent le même espace de travail que les jointeurs : la voie publique. Cependant, malgré une apparente similitude des activités d'ouverture de couvercles de puits d'accès, il importe de souligner quelques différences. Les couvercles de postes d'alimentation d'Hydro-Québec sont fréquemment situés sur des trottoirs en béton plutôt que sur la chaussée en asphalté. Comme le béton est plus lisse et plus dur que l'asphalté, ceci exige de l'outil qu'il ait un mors particulièrement agressif pour tenir sur la surface de contact. De plus, les jointeurs n'ouvrent jamais de grilles circulaires, car les postes d'alimentation sont toujours scellés par des tampons sans pattes. Contrairement aux couvercles manipulés par les cols bleus, ceux d'Hydro-Québec sont standardisés dans toute la province; enfin, les trous d'ancrage de ceux-ci sont rectangulaires et non carrés comme ceux des couvercles d'égout et d'aqueduc.

Les observations effectuées ont permis de confirmer l'excellente adhérence de l'outil HQ sur l'asphalté, toutefois, selon des opérateurs d'Hydro-Québec, elle laisse parfois à désirer sur le béton. La grande longueur de la sangle de l'outil permet en tout temps à l'opérateur de se placer à une distance sécuritaire du puits d'accès, et lors de la fermeture ce dernier peut se placer directement de l'autre côté du puits d'accès pour faire l'opération en un seul coup. L'outil HQ est celui qui a obtenu les meilleurs scores pour les mesures subjectives de force lors de l'ouverture d'un tampon avec une moyenne de seulement 1,2 sur l'échelle de Borg, ce qui est dû à son grand bras de levier. Mais d'après nos analyses biomécaniques, le design de l'outil ne respecte pas la norme EN-1005-3 (2002), car il requiert encore une force trop élevée pour être considéré sécuritaire (seuls 89% des hommes et 74% des femmes ont la force nécessaire au niveau de la hanche). Par ailleurs, 30% des opérateurs ont jugé que cet outil n'était pas adapté aux

grilles (pour lesquelles il n'a pas été conçu, à sa décharge), entre autres parce que son plateau le rendait encombrant et donc peu maniable lors des nombreux repositionnements nécessaires à la fermeture d'une grille à emboîtement. La forme refermée de son crochet convient toutefois étonnamment bien aux rainures des grilles, puisqu'il ne s'est désolidarisé aucune fois pendant les essais. Par contre, l'inconvénient de sa forme est qu'elle le rend difficile à insérer dans les trous d'ancrage carrés (arête de 3,2 cm) de certains modèles de tampons d'égout et d'aqueduc.

Enfin, l'outil HQ n'offre pas une fonction intégrée de nettoyage du cadre, contrairement au protol et au prototype 3. Une petite racle est fournie dans le manche, mais son utilisation requiert de se pencher jusqu'au sol, près du trou d'accès, et rien n'empêche qu'elle soit échappée accidentellement, sans parler des risques de chute de l'opérateur lui-même. L'autre solution de nettoyage est de le faire avec les mains ou avec un autre outil quelconque. D'autre part, le mécanisme de sangle à cliquet de l'outil HQ n'est pas protégé, ce qui découvre un angle entrant.

En somme, les inconvénients de l'outil HQ sont essentiellement les suivants :

- Bien adapté aux tampons, mais moins aux grilles;
- Force requise trop élevée pour respecter la norme EN-1005-3 (2002);
- Plateau jugé encombrant par plusieurs opérateurs;
- Absence de fonctionnalité de nettoyage du cadre;
- Mécanisme de sangle à cliquet non protégé.

4.6 Élaboration du prototype 4

L'élaboration du prototype 4 a fait suite à l'analyse des résultats du prototype 3, du protol et de l'outil HQ. Le but était de déterminer les avantages et inconvénients de ces trois outils et d'en tirer le meilleur pour développer un outil adapté à la tâche des égoutiers et ouvriers des eaux. Les différentes parties constituant un outil de levage ont été examinées, une par une, et sont présentées ici.

4.6.1 Mors

L'amélioration de l'adhérence a naturellement été fixée comme priorité, étant donné que d'après nos questionnaires celle-ci était la qualité la plus importante pour les opérateurs (voir section 3.6.2). Le tableau 4.1 présente les principaux avantages et inconvénients de chaque mors.

Tableau 4.1 : Avantages et inconvénients des différents mors

	Avantages	Inconvénients
Prototype 3	-Mors remplaçable (plaque rivetée)	-Mauvaise adhérence -Étrier en U inversé inconfortable -Rivets fragiles -2 pointes saillantes sur les côtés
Protol	-Bonne adhérence -Forme en L (permet d'utiliser poids corporel au-dessus du mors)	-Mors soudé et non remplaçable
Outil HQ	-Excellente adhérence -Mors remplaçable (7 pointes de carbure)	-Plateau encombrant (peu pratique pour les grilles) -Absence d'embout pour nettoyer

La comparaison de ces trois mors nous a mené à suggérer au fabricant d'adopter un mors de type protol, mais où les trois rangées de dents seraient soudées à une plaque de métal, elle-même boulonnée à la base de l'outil. Ainsi, les qualités d'adhérence du protol seraient conservées, mais avec un mors remplaçable en cas d'usure.

4.6.2 Manche

Le design du manche a un impact sur la forme générale de l'outil, son poids et la prise prévue pour les mains. Le tableau 4.2 indique les principaux atouts et inconvénients de chaque outil, ainsi que le ratio du bras de levier, tel que calculé à la section 3.4.4. Notons que la qualité « permet d'ouvrir et fermer un couvercle sans forcer », dépendant directement de l'avantage mécanique offert à l'utilisateur, est la quatrième plus importante aux yeux des opérateurs.

Tableau 4.2 : Avantages et inconvénients des différents manches

	Avantages	Inconvénients
Prototype 3	-Grand bras de levier (ratio 0,67 en S1; 0,64 en S2; 0,61 en S3)	-Manche large (diam. 5,4 cm) et outil lourd (7,45 kg) -Sangle à l'intérieur du manche -S'approche trop du menton (1,44 m)
Protol	-Manche étroit (diam. 2,5 cm) et outil léger (4,90 kg)	-Petit bras de levier (ratio de 0,54) -Prise glissante (en caoutchouc) -Prise à 1 main (longueur 13 cm)
Outil HQ	-Grand bras de levier (ratio 0,67) -Manche étroit (diam. 3,3 cm) et outil léger (5,54 kg) -Sangle à l'extérieur du manche -Prise à 2 mains (manche rainuré sur 40 cm)	

La légèreté étant ressortie comme la troisième plus grande préoccupation des opérateurs, après l'adhérence au sol et le caractère sécuritaire de l'outil, nous avons établi que le poids de l'outil devrait se situer entre les valeurs cibles de 4,90 kg (protol, jugé léger par 100% des opérateurs) et 5,54 kg (outil HQ, jugé léger par 86% des opérateurs). Ainsi, il a été proposé au fabricant d'atteindre cet objectif en faisant passer la sangle à l'extérieur du manche plutôt qu'à l'intérieur pour réduire le diamètre du manche, et donc la quantité de métal. Dans le même but, le manche proposé était de section circulaire, plutôt que carrée comme le prototype 3.

Pour obtenir un ratio d'avantage mécanique intéressant, mais sans avoir un manche trop haut et arrivant trop près du menton de petits individus comme celui du prototype 3, la hauteur proposée a été celle de l'outil HQ (1,37 m). De plus, il a été noté que seul l'outil HQ permettait réellement une prise confortable à deux mains (de préférence à une seule), puisque son manche était rainuré sur une grande longueur (40 cm). Toutefois, nous avons plutôt proposé au fabricant d'installer une double poignée, de style transpalette (voir figure 2.7), qui permet à l'opérateur d'utiliser ses deux bras et ainsi répartir l'effort symétriquement entre les membres, vis-à-vis de l'articulation de l'épaule.

Étant donné les nombreuses modifications demandées sur le prototype (nouveau mors, hauteur du manche réduite, double poignée, poids de l'outil diminué), il devenait difficile de prévoir si l'effet de la hauteur de sangle serait le même que sur le prototype 3. Pour cette raison, il a été demandé de garder les trois niveaux de sangle ajustables afin de vérifier l'impact sur le prochain outil. Les spécifications étaient : S1 à 47,6 cm (ratio de 0,65), S2 à 55,2 cm (ratio de 0,60) et S3 à 62,8 cm (ratio de 0,54).

4.6.3 Système de sangle à cliquet

Le prototype 3 et l'outil HQ présentent approximativement le même système de sangle à cliquet, celui du prototype 3 étant légèrement plus évolué, comme le montre le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Avantages et inconvénients des différents systèmes de sangle à cliquet

	Avantages	Inconvénients
Prototype 3	-Bouton apprécié des opérateurs	-Sangle difficile à étirer
Protol	SO	SO
Outil HQ	-Longue sangle sécuritaire (2,2 m)	-Mécanisme non protégé

Au vu de ces avantages et inconvénients, nous avons proposé au fabricant de conserver le système de sangle à cliquet du prototype 3, mais en installant une sangle plus longue (2,2 m) ainsi qu'un ressort plus long et donc moins raide pour faciliter l'étirement de la sangle.

4.6.4 Crochet

Le crochet étant un élément essentiel de l'outil, la comparaison a été effectuée entre les trois outils, tel que décrit au tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Avantages et inconvénients des différents crochets

	Avantages	Inconvénients
Prototype 3	-Possibilité de fixer le crochet sur l'outil pour moins se pencher pour installer le crochet	-Nécessité de se pencher pour fixer le crochet sur l'outil (voir annexe 2) -Crochet saillant lorsque fixé -Crochet se désolidarise des grilles -Crochet massif et lourd (450 g) -Crochet d'appoint inutile
Protol	-Crochet tient bien sur couvercles	-Forme du crochet adaptée au bras rigide (pas à une sangle)
Outil HQ	-Crochet tient bien sur couvercles -Crochet fin et léger (270 g)	-Difficile à insérer dans petits trous d'ancrage (certains tampons)

Ces constatations nous ont mené à proposer un crochet de type HQ, car léger et bien adapté aux grilles, mais avec une forme légèrement plus ouverte afin de faciliter son insertion dans les trous d'ancrage de petite taille, propres à certains tampons. Le crochet d'appoint situé à l'arrière du prototype 3 a été abandonné parce que généralement inutile (seul un coup de masse parvenant à déloger un couvercle coincé) et même parfois dangereux (voir incident à l'annexe 3).

4.7 Prototype 4

L'analyse des résultats du prototype 4 (voir photo, figure 2.7) a révélé que cet outil avait reçu un accueil enthousiaste des opérateurs, celui-ci ayant, de tous les outils testés dans cette étude, été jugé le plus adapté à l'ouverture et à la fermeture de tampons et de grilles (voir section 3.4.5). L'adhérence s'est améliorée par rapport au prototype 3, puisque le nombre d'incidents « perte d'adhérence au sol » est passé d'une moyenne de 2 par essai à une moyenne de 0,14 par essai pour le prototype 4 en S2 (à comparer avec le résultat du protol : 0,13 glissement/essai). Dans l'ensemble, 77% des opérateurs ont jugé que l'outil était sécuritaire et 100% ont affirmé qu'il était léger. La hauteur du manche a permis d'offrir un bon avantage mécanique aux opérateurs, puisque 89% d'entre eux ont affirmé que cet outil « permettait d'ouvrir et fermer un couvercle sans forcer ». Ceci pourrait aussi être dû à l'apparition de la double poignée, très appréciée des opérateurs, car elle permet de diviser l'effort entre les deux bras et rend, selon eux, l'outil plus maniable lors de l'opération de nettoyage du cadre avec l'embout prévu à cet effet. Les mesures de force effectuées à l'aide de l'échelle de Borg ont, quant à elles, indiqué que l'effort perçu par les individus lors de l'utilisation du prototype 4 se situait en moyenne sous la barre du 2 sur 10, ce qui représente un effort « faible ». Enfin, 89% des opérateurs ont déclaré que le prototype 4 était « facile à contrôler lors de l'activité ».

L'analyse biomécanique de l'ouverture avec le prototype 4 a montré que cet outil présentait une réduction significative de la contrainte en L₅/S₁ par rapport à l'outil HQ (baisse de 47% de la force de compression), au prototype 3 (baisse de 38%) et au protol (baisse de 35%). C'est aussi l'outil qui permet d'accommoder la plus grande proportion d'utilisateurs masculins (au moins 95%, dépendamment de l'articulation), cependant, seulement 72% des femmes possèdent la force requise au niveau de la hanche. Mais comme ces valeurs concernent des efforts isolés, force est de constater que l'outil ne répond pas aux exigences de design sécuritaire (EN-1005-3, 2002). Tout au moins apporte-t-il une amélioration par rapport au protol.

D'autres aspects restent aussi à améliorer. D'abord, à une occasion lors des essais sur le terrain, il a été impossible pour l'opérateur d'insérer le crochet dans le trou d'ancrage d'un tampon. De plus, il s'est avéré que le mors était légèrement décalé par rapport à l'axe du manche de l'outil, ce qui induisait un moment de rotation lors de l'effort et rendait l'outil instable. Le mors lui-même était plus épais et large que celui du protol et forçait les individus de petite taille à ne s'appuyer que sur le bout du pied (voir photo, figure 3.8). Enfin, l'emplacement du bouton permettant de libérer la sangle à cliquet a été jugé trop haut, car lors de l'installation du crochet sur le couvercle, il fallait, d'une main, le maintenir enfoncé et de l'autre main, diriger le crochet dans le trou d'ancrage. L'opérateur se trouvait alors à faire le « grand écart » avec les bras, une position peu confortable, particulièrement pour les individus plus petits (voir photo, figure 3.8). De plus, lors du tirage d'un couvercle, il fallait à chaque fois déplacer la main de la double poignée vers le bouton pour libérer la sangle, ce que certains opérateurs trouvaient lassant. En plaçant ce bouton sur le manche, au-dessus du ressort et tout juste à la base de la double poignée, la distance entre le bouton et le crochet se trouverait diminuée et l'accès pourrait se faire plus directement, les doigts pouvant atteindre celui-ci tout en gardant la main sur la double poignée.

4.8 Recommandations

La génération de quatre prototypes a permis de raffiner le design de façon graduelle et d'arriver progressivement à une version fonctionnelle de l'outil. Par conséquent, les améliorations recommandées pour le prototype 4 sont mineures. En somme, le fabricant devra s'assurer d'apporter les améliorations nécessaires suivantes à l'outil :

- Adapter le crochet aux tampons à petits trous d'ancrage (dimension 3,2 cm²);
- Placer le mors vis-à-vis l'axe du manche de l'outil;
- Réduire l'épaisseur et la largeur du mors sous le pied;
- Rendre le bouton de la sangle à cliquet plus accessible en diminuant sa hauteur.

4.9 Amélioration par rapport à l'existant

Il importe d'indiquer en quoi le prototype 4 apporte une amélioration aux outils de levage comparables qui existent, soit le protol et l'outil HQ. Le tableau 4.5 récapitule, de façon comparative, les qualités qui sont atteintes (+), ou non (-), par chacun des trois outils. Le signe -/+ signifie que la qualité est atteinte imparfaitement ou dans certaines conditions seulement.

Tableau 4.5 : Améliorations apportées aux outils existants par le prototype 4

	Qualités	Protol	Prototype 4	Outil HQ
SÉCURITÉ	Posture dos droit lors de l'effort	+	+	+
	Compression en L ₅ /S ₁ acceptable (toujours < 3,4 kN)	-/+	+	-/+
	Accommode un haut % de population (force requise)	-/+	-/+	-/+
	Avantage mécanique (grand bras de levier)	-	+	+
	Bonne adhérence au sol	+	+	+
	Économie de mouvements lors du tirage du couvercle	-	+	+
	Léger	+	+	+
	Système d'absorption d'énergie (sangle)	-	+	+
	Possibilité de prise à deux mains	-	+	-
	Prise pour les mains non glissante	-/+	+	+
UTILISABILITÉ	Adapté aux tampons sans pattes	+	+	+
	Adapté aux tampons à pattes	-	-	-
	Adapté aux grilles circulaires	-/+	+	-/+
	Adapté aux grilles rectangulaires	-/+	-/+	-/+
	Permet le nettoyage facile du cadre	-/+	+	-
	Mors et crochet remplaçables	-	+	+

4.10 Contribution et limites de l'étude

La principale contribution de cette étude est la participation à la conception et à l'évaluation d'un outil conçu pour le levage de couvercles ainsi que la documentation de l'utilisation d'une approche ergonomique pour le développement du produit. À ce jour, quelques auteurs se sont intéressés à la tâche de levage de couvercles et en ont relevé les risques à la santé et sécurité, comme par exemple Allard-Lormier et coll. (1995) dont les travaux ont répertorié un grand nombre de risques accidentels et infectieux. Quant à eux, Friedrich et coll. (1999) ont trouvé une grande prévalence de troubles musculo-squelettiques du dos à l'aide d'une étude épidémiologique auprès d'égoutiers. Doit et Aptel (1993) ont examiné la posture de travail lors du lever de plaques d'égout afin d'estimer la contrainte lombaire lors du décollement. Chang et coll. (2003) ont analysé l'effet du design de trois catégories d'outils sur la contrainte biomécanique de techniciens en télécommunication chargés d'ouvrir des puits d'accès. Enfin, Imbeau et coll. (2003) ont recensé les outils existants dans le milieu des égouts et aqueducs et ont procédé à leur évaluation d'un point de vue de la sécurité d'utilisation.

Ces études ont joué un rôle essentiel pour la description et la quantification des risques liés au levage de couvercles. C'est sur cette base de connaissances que la présente étude a pu amorcer la réalisation d'un nouvel outil spécifiquement conçu pour cette tâche, et ainsi proposer une solution concrète aux opérateurs concernés. De plus, ce projet a rassemblé les efforts de trois partenaires (un fabricant d'outil de voirie, des employés municipaux et une équipe de recherche en ergonomie) et a permis à ceux-ci d'allier leurs forces respectives, soit l'expérience en conception d'outil, la connaissance pratique du milieu et l'application des principes d'ergonomie.

Les limites de cette étude proviennent principalement du fait que les observations se sont entièrement déroulées sur le terrain, ce qui a, d'une part, limité l'échantillon puisque chaque essai se déroulait pendant les heures normales de travail et, d'autre part, entraîné

une variabilité des résultats dû aux fluctuations de l'environnement (conditions climatiques, emplacement du couvercle, etc.). Des expériences en laboratoire auraient pu restreindre cette variabilité, mais auraient été peu réalistes et auraient limité notre accès aux opérateurs.

De plus, l'effet des modes opératoires n'a pas été examiné dans cette étude, or, comme l'ont montré Authier, Lortie et Gagnon (1996), pour une tâche de manutention donnée, les stratégies adoptées par les opérateurs experts ne sont pas les mêmes que celles des novices. Même si les opérateurs rencontrés dans le cadre de cette étude étaient des experts en levage de couvercles, ils étaient des novices par rapport aux prototypes qu'on leur présentait. Ainsi, le fait de comparer des prototypes à des outils familiers a certainement désavantagé les prototypes, mais cette étude ne nous permet pas d'affirmer si une formation de type « gestes et postures » aurait un effet sur la façon dont les opérateurs s'en serviraient dans le futur.

De plus, même si tous les outils analysés dans cette étude ont l'avantage de procurer à l'opérateur une posture dos-droit pendant l'effort de décollement du couvercle, les analyses biomécaniques ont montré que seule une faible proportion de la population industrielle et en santé avait la force requise pour les utiliser, sans risque de voir apparaître des troubles musculo-squelettiques à long terme. Par ailleurs, les mesures effectuées n'indiquent pas de façon précise lequel génère la plus faible contrainte posturale cumulative sur la durée d'une journée de travail.

Afin de valider le concept du prototype 4, il serait nécessaire de le tester en conditions réelles, c'est-à-dire sur une période prolongée et sans la présence d'un agent de recherche. C'est pourquoi la prochaine étape, prévue dans le cadre de cette démarche de conception, sera de remettre à plusieurs équipes de cols bleus des exemplaires du prototype 4 amélioré selon nos recommandations (soit le prototype 5). La consigne sera tout simplement de l'utiliser le plus possible et dans toutes les conditions rencontrées sur

le terrain. Après quelques semaines, les commentaires des opérateurs pourront être recueillis en ce qui a trait à la fréquence d'utilisation, l'adaptation de l'outil à la tâche et aux conditions climatiques, sa robustesse, etc. Une façon conséquente de le faire serait de se baser sur la liste des 13 qualités généralement recherchées pour un outil de levage, qui ont d'ailleurs été utilisées comme repères de conception, tout en notant aussi les commentaires spontanés ou suggestions d'améliorations des opérateurs.

Enfin, même si les tampons munis de pattes-guides ont été exclus dès le début de cette étude, il n'empêche pas que les problèmes liés à leur manutention demeurent une réalité. Le remplacement progressif des couvercles, détériorés par le temps, par des tampons à pattes, fait en sorte que leur nombre ne pourra qu'augmenter. Notre souhait est donc que les ressources nécessaires soient allouées à l'étude de cette problématique afin d'arriver à un design d'outil adapté et sécuritaire.

CHAPITRE 5 : CONCLUSION

Cette étude avait pour but de participer à la conception et procéder à l'évaluation de plusieurs générations de prototypes d'un outil conçu pour le levage de couvercles circulaires et sans pattes d'aqueduc et d'égout. Deux étapes principales ont permis d'atteindre cet objectif : d'abord, trois prototypes ont successivement été développés et testés sur le terrain. Par la suite, ils ont été comparés entre eux et à deux autres outils existants, ce qui a permis de passer à l'élaboration d'un quatrième prototype. Les essais sur le terrain de ce dernier ont permis d'examiner son niveau d'adaptation et son caractère sécuritaire et des recommandations ont été formulées dans ce rapport afin d'obtenir l'outil final.

En conclusion, cette étude aura eu comme résultat concret un nouvel outil qui sera remis à des équipes d'égoutiers et d'ouvriers des eaux de la Ville de Montréal. Elle aura également permis de documenter l'utilisation d'une approche ergonomique pour le développement du produit en question. Même si le nouvel outil ne permet pas d'éliminer tous les risques liés à la manipulation des couvercles, il constitue une amélioration par rapport à l'existant sur plusieurs aspects, principalement des points de vue sécurité et utilisabilité. Qui plus est, nous sommes confiants que l'outil sera bien accueilli par le corps de métier en question, car, tout au long du processus, l'avis professionnel des opérateurs a été sollicité et valorisé.

Enfin, il nous apparaît souhaitable qu'une étude similaire soit entreprise dans le but de développer un outil approprié pour la manipulation des tampons munis de pattes guides, car leur utilisation est de plus en plus répandue au Québec et pose de nouveaux défis aux opérateurs.

RÉFÉRENCES

AKAO, Y. (1990). *Quality function deployment: Integrating customer requirements into product design*. Portland (OR): Productivity Press, 369 p.

ALLARD-LORMIER, C., HILAIRE, C., LA FOLIE, P., RAGU, L., SEGALIN, M. (1995). « Le travail en égouts ». *Cahiers de médecine interprofessionnelle*, n° 3, pp. 303-312.

AUTHIER, M., LORTIE, M., GAGNON, M. (1996). « Manual handling techniques: Comparing novices and experts ». *International Journal of Industrial Ergonomics*, n° 17, pp. 419-429.

BORG, G. (1998). *Borg's Perceived Exertion and Pain Scales*, Champaign (IL): Human Kinetics, 120 p.

CHANG, C., ROBERTSON, M., MCGORRY, R. (2003). « Investigating the effect of tool design in a utility cover removal operation ». *International Journal of Industrial Ergonomics*, n° 32, pp. 81-82.

CLAUSING, D. (1994). *Total quality development: a step-by-step guide to world class concurrent engineering*, New York (NY): ASME Press, 506 p.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (2002). *Sécurité des machines – Performance physique humaine – Partie 3 : Limites des forces recommandées pour l'utilisation de machines*, Bruxelles (Belgique) : CEN, EN-1005-3, 23 p.

DAVIS, S., NEELEY, A. (1995). « A new tool design for the manual lifting and handling of load bearing vault lids ». In: Bittner, Champney (Eds), *Advances in Industrial and Ergonomics Safety VII*, London (UK): Taylor & Francis, pp. 377-383.

DERFOUL, Z., LORTIE, M., IMBEAU, D., BÉLANGER, R. (2001). « Manipulation des couvercles d'égouts et de puisard: repères de conception facilitant l'activité de levage ». *Actes du congrès conjoint SELF-ACE – 36e Congrès annuel de la Société d'ergonomie de langue française et 32e Congrès annuel de l'Association canadienne d'ergonomie – Les transformations du travail, enjeux pour l'ergonomie* (vol. 5, pp. 97-102), Montréal (QC) : ACE.

DERFOUL, Z. (2002). *Étude sur la manipulation des couvercles d'égouts et de puisard*, Mémoire de maîtrise inédit, Université du Québec à Montréal, 79 p.

DOIT, J. L., APTEL, M., HORWAT, F. (1993). « Estimation de la contrainte lombaire lors du décollement de plaques d'égout ». *Cahiers de notes documentaires – Sécurité et hygiène du travail*, n° 152, pp. 453-460.

FRIEDRICH, M., CERMAK, T., HEILLER, I. (2000). « Spinal troubles in sewage workers: epidemiological data and work disability due to low back pain ». *International Archives of Occupational and Environmental Health*, n° 73, pp. 245-254.

IMBEAU, D., FARBOS, B., BÉLANGER, R., MASSÉ, S. (2003). *Évaluation des activités d'ouverture et de fermeture de couvercles de puits d'aqueducs et d'égouts*. Rapport de recherche R-331. Montréal (QC): Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité au travail, 43 p.

IMBEAU, D., NASTASIA, I., FARBOS, B. (2004). « Troubles musculo-squelettiques : évaluation et conception du travail ». In B. Roberge, J.-E. Deadman, M. Legris, L.

Ménard & M. Baril (Éds), *Manuel d'hygiène du travail : Du diagnostic à la maîtrise des facteurs de risque*, Mont-Royal (Qc) : Modulo-Griffon, (pp. 321 à 375).

LAVENDER, S., MIRKA, G., SCHOENMARKLIN, R., SOMMERICH, C., SUDHAKAR, L., MARRAS, W. (1989). « The effects of preview and task symmetry on trunk muscle response to sudden loading », *Human Factors*, n° 31 (1), pp. 101-115.

MITAL, A., MOTORWALA, A. (1995). « An ergonomic evaluation of steel and composite access covers ». *International Journal of Industrial Ergonomics*, n° 15, pp. 285-296.

NATIONAL INSTITUTE OF OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH (1981). *Work practices guide for manual lifting*. Cincinnati (OH): US Department of Health and Human Services, n° 81-122, 83 p.

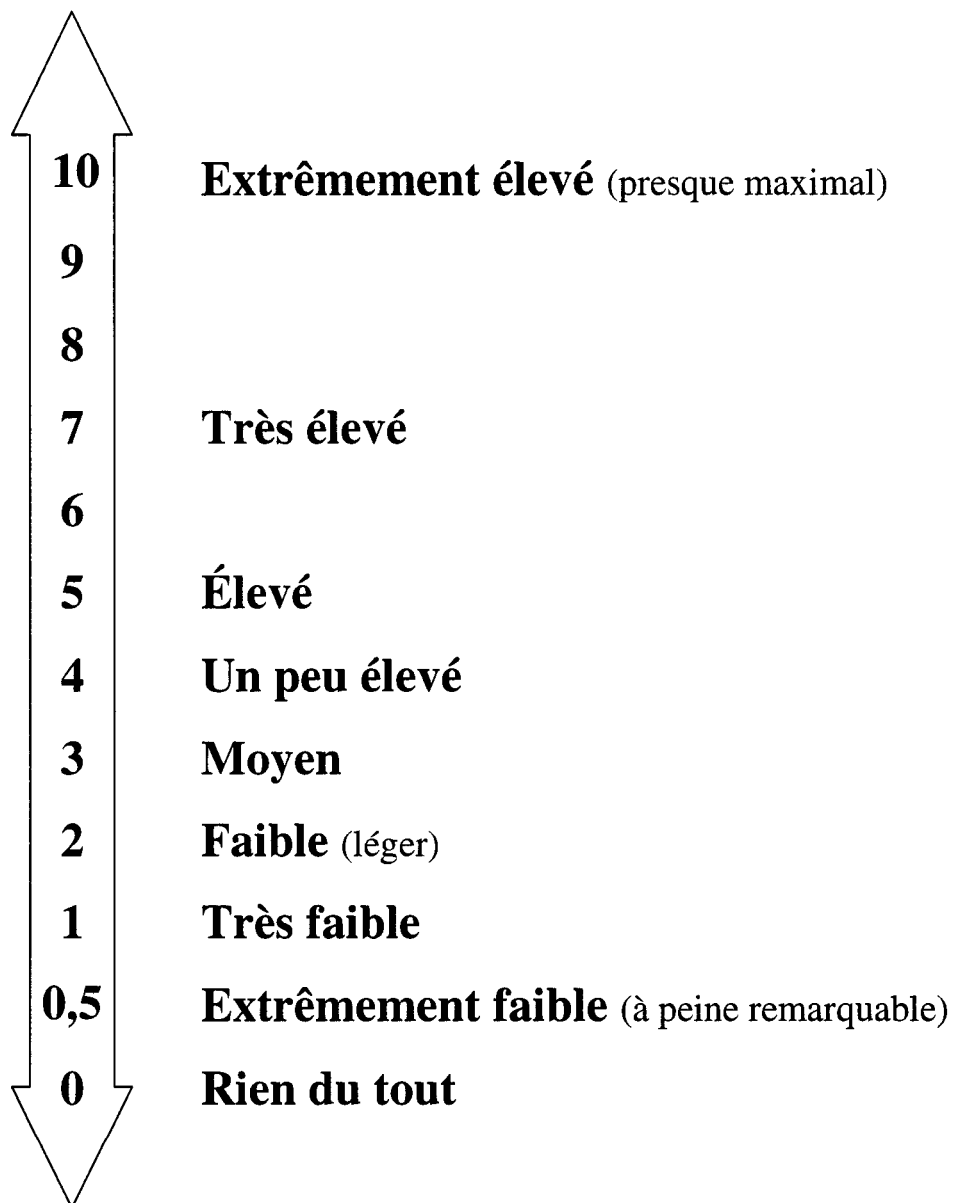
PUTZ-ANDERSON, V. (1988). *Cumulative trauma disorders: A manual for musculoskeletal diseases of the upper limbs*. London (UK) : Taylor & Francis, 151 p.

SCHERZINGER, P., WILLETT, B., KAUCHARIK, D., PAQUETTE, G. (1994). « Development of a catch basin cover handling tool: A collaborative design process ». *Proceedings of the 12th triennial congress of the International Ergonomics Association*, (vol. 4, pp. 32-34), Toronto (ON): Human Factors Association of Canada.

UNIVERSITY OF MICHIGAN (2003). 3D Static Strength Prediction Program (3DSSPP), version 3.4.6, Center of Ergonomics, 1205 Beal Ave., Ann Arbor (MI), 48109.

WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF LABOR AND INDUSTRIES (2002).
Ergonomics demonstration project: Utilities, Spokane (WA): Department of Labor and
Industries, 58 p.

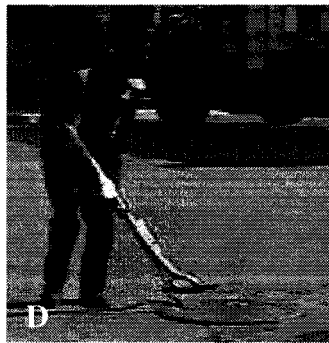
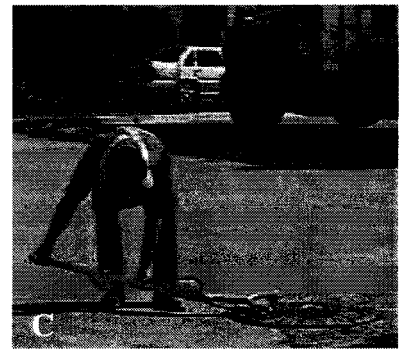
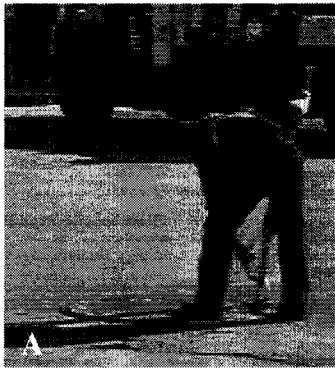
ANNEXES

ANNEXE 1 : EFFORT PERÇU (ÉCHELLE DE BORG)

Source (traduction libre) : *Borg's Perceived Exertion and Pain Scales* (1998), p.72.

ANNEXE 2 : INSTALLATION DU CROCHET AVEC LES PROTOTYPES 1, 2 ET 3

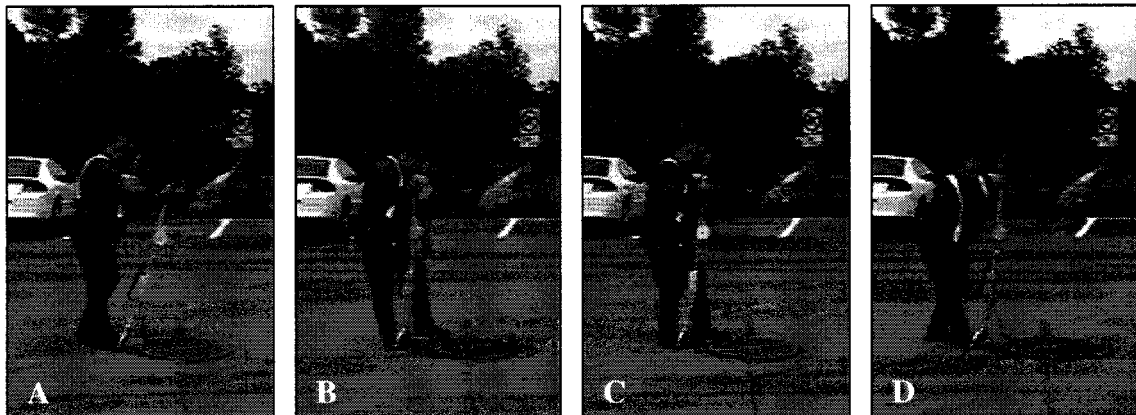
Les prototypes 1, 2 et 3 sont munis d'une petite protubérance métallique qui permet de fixer le crochet à l'outil. L'objectif du fabricant était de permettre à l'opérateur d'installer le crochet sur le couvercle sans se pencher jusqu'au sol. Toutefois, les images suivantes montrent que l'opérateur doit d'abord se pencher à environ 90° pour fixer le crochet sur la protubérance (image A), et encore plus pour installer le crochet sur le couvercle (image C) en positionnant l'outil à l'horizontale.



L'intérêt de cette fonction est donc limité, d'autant plus que le crochet, lorsque fixé sur la protubérance, est saillant (image B) et présente un risque de blessure s'il est mal entreposé ou si un individu tombe dessus par inadvertance.

ANNEXE 3 : INCIDENTS SURVENUS AVEC LE PROTOTYPE 3

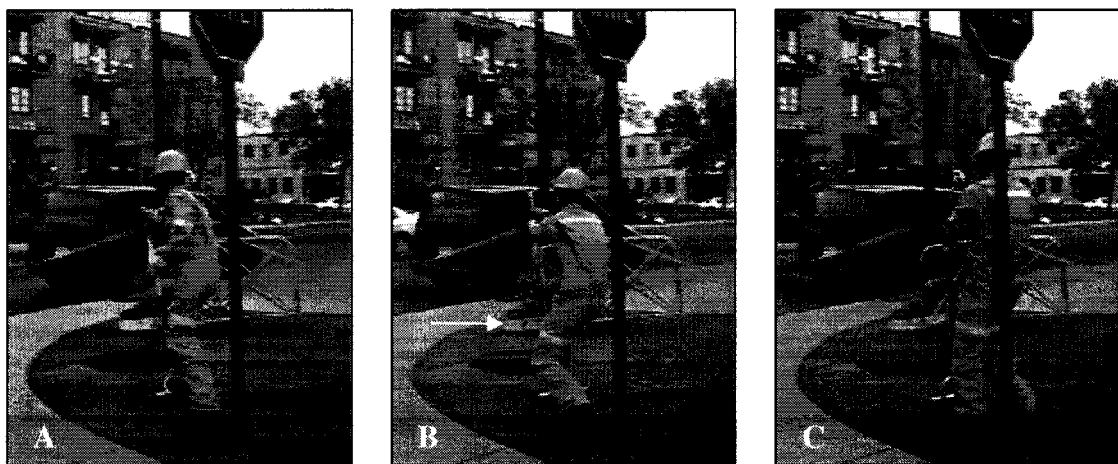
Incident 1 : un opérateur se cogne le genou sur le crochet d'appoint du prototype 3



Déroulement :

- A. Fermeture d'une grille circulaire à rainures horizontales;
- B. L'opérateur utilise son pied gauche pour pousser la grille vis-à-vis de son emboîtement, rapprochant ainsi le genou droit de l'outil;
- C. L'opérateur se cogne le genou droit sur le crochet d'appoint replié;
- D. L'opérateur ressent une douleur au genou droit.

Incident 2 : une opératrice utilisant le prototype 3 se cogne le dos contre un poteau



Déroulement :

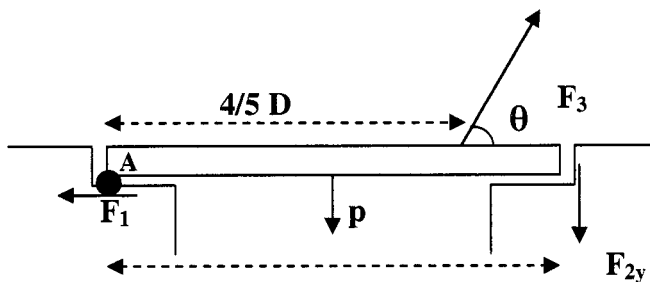
- A. Ouverture d'un tampon sans pattes;
- B. Le crochet (flèche) se désolidarise du couvercle;
- C. L'opératrice perd l'équilibre et se cogne contre le poteau.

ANNEXE 4 : CALCUL DES FORCES EN ÉQUILIBRE AVEC LE PROTOL

Le calcul suivant permet d'estimer la force requise au niveau des bras grâce à un schéma simplifié des forces en équilibre au moment du décollement avec un protol.

A) Calcul de F_3 , la force nécessaire au soulèvement du couvercle :

- Données : Masse couvercle $p = 100$ kg, Diamètre $D = 0,76$ m, angle $\theta = 60^\circ$, Coefficient de friction $\mu = 0,25$ (acier/acier), F_1 et F_2 sont les forces de friction;
- Hypothèse : au moment du décollement du couvercle, le point A est un pivot.



D

$$\Sigma M_A = 0$$

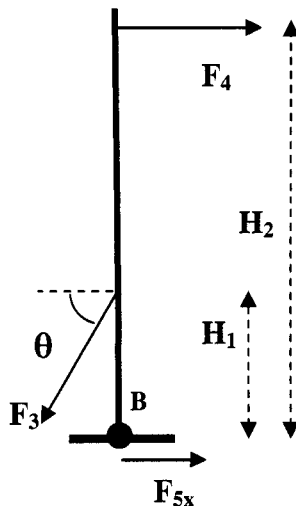
$$F_3 \cdot \sin 60^\circ \cdot \frac{4}{5} D - p \cdot \frac{1}{2} D - F_{2y} \cdot D = 0$$

$$\text{Or, } F_{2y} = \mu \cdot N \text{ et } N = F_{3x} \text{ donc } F_{2y} = \mu \cdot F_{3x} = 0,25 \cdot F_3 \cdot \cos 60^\circ$$

$$F_3 \cdot \sin 60^\circ \cdot \frac{4}{5} D - p \cdot \frac{1}{2} D - 0,25 \cdot F_3 \cdot \cos 60^\circ \cdot D = 0$$

$$F_3 \cdot \sin 60^\circ \cdot \frac{4}{5} \cdot 0,76 - 100 \cdot 9,81 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,76 - 0,25 \cdot F_3 \cdot \cos 60^\circ \cdot 0,76 = 0$$

$$F_3 = 864 \text{ N}$$



B) Calcul de F_4 la force requise par les bras pour soulever le couvercle :

- Données : Hauteur outil $H_2 = 1,19$ m, Hauteur bras rigide $H_1 = 0,55$ m, angle $\theta = 60^\circ$;
- Hypothèse : l'adhérence au sol au point B est parfaite et ce point est un pivot.

$$\Sigma M_B = 0$$

$$F_4 \cdot H_2 - F_{3x} \cdot H_1 = 0$$

$$F_4 \cdot H_2 - F_3 \cdot \cos 60^\circ \cdot H_1 = 0$$

$$F_4 \cdot 1,19 - 864 \cdot \cos 60^\circ \cdot 0,55 = 0$$

$$F_4 = 198 \text{ N}$$