

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

EFFET D'UN CHOC ÉLECTRIQUE SUR LA CONTRACTION MUSCULAIRE :

PROJECTION VS TÉTANISATION

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN KINANTHROPOLOGIE

PAR

SYLVAIN HÉBERT

DÉCEMBRE 2013

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

Table des matières

LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
RÉSUMÉ	vii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
MISE EN CONTEXTE DU PROBLÈME.....	2
1.1 Historique des accidents	2
1.2 Effets d'un choc électrique	2
1.3 Effets sur la contraction musculaire	3
1.4 La problématique.....	4
1.5 Objectif et limites de la recherche	5
1.6 Intérêt de la recherche et motivations personnelles.....	6
CHAPITRE II	
CADRE THÉORIQUE	8
2.1 Notions de base d'électricité.....	8
2.2 Effets du courant sur le corps humain	10
CHAPITRE III	
MÉTHODOLOGIE.....	15
3.1 Sélection des cas étudiés.....	16
3.2 Contraintes lors de la consultation des bases de données.....	17
3.3 Choix des rapports	18
3.4 Grille d'analyse.....	21
Provenance.....	21
La date	22
Entreprise.....	22
Ville – Province – État.....	22
Lieux (intérieur/extérieur)	23

Facteur climatique particulier	23
Nombre de travailleurs	23
Résultat (blessure/décès)	23
Type (projection – Tétanisation)	24
Voltage.....	24
Ampérage.....	25
Cause.....	25
Âge, Expérience, Sexe, Origine Ethnique, Formation	25
Entrée et Sortie du courant	26
Activité lors de l'accident.....	26
Commentaires	26
CHAPITRE IV	
RÉSULTATS	27
4.1 Réaction musculaire.....	28
4.2 Conséquences lors des chocs électriques.....	34
4.3 Causes de la blessure ou du décès	38
4.4 Points d'entrée et de sortie du courant.....	42
4.5 Source des rapports d'accidents.....	46
4.6 Catégories d'emplois	51
4.7 Autres résultats	52
CHAPITRE V	
INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.....	53
5.1 Retour sur les résultats.....	53
5.2 Type de réaction musculaire.....	54
5.3 Type de réaction musculaire et niveau de tension.....	56
5.4 Conséquences de l'accident.....	59
5.5 Cause de la blessure ou du décès.....	64
5.6 Points d'entrée et de sortie du courant.....	70
5.7 Source du rapport d'accident:.....	71
5.8 Impact de l'environnement sur le type de réaction musculaire	78

5.9 Informations complémentaires provenant de l'analyse	80
CHAPITRE VI	
COMPARAISON ENTRE LA THÉORIE ET LES RÉSULTATS DES ANALYSES	82
6.1 Effets du courant alternatif VS courant continu.	82
6.2 Effets du niveau de tension.....	85
6.3 Conséquences du choc électrique	86
6.4 Influence des points d'entrée et de sortie du courant	87
6.5 Influence de la source du rapport d'accident	89
6.6 Données sur le travailleur	90
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	92
7.1 Recommandations.....	94
RÉFÉRENCES.....	97

Liste des figures

Figure	Page
1 Répartition de la provenance des rapports analysés	27
2 Réaction musculaire.....	29
3 Niveau de tension pour chaque type de réaction musculaire	32
4 Type de réaction musculaire observée en fonction du niveau de tension.....	34
5 Conséquence d'un choc électrique.....	35
6 Conséquence de l'accident en fonction du type de réaction musculaire.....	37
7 Conséquence de l'accident en fonction du niveau de tension.....	38
8 Cause de la blessure ou du décès du travailleur.....	39
9 Causes de la conséquence (blessure ou décès) en fonction du type de réaction musculaire observée	40
10 Régions du corps impliquées lors du choc électrique en fonction du type de réaction musculaire	46
11 Type de réaction musculaire observée en fonction de la provenance du rapport ..	49
12 Conséquence de l'accident en fonction de la source du rapport.....	51
13 Type d'emploi occupé par la victime.....	51
14 Pourcentage de blessures/décès en fonction du type de réaction musculaire	60
15 Conséquence de l'accident lorsqu'il y a réaction de projection.....	61
16 Conséquence de l'accident lorsqu'il y a réaction de tétanisation	61
17 Conséquence en fonction du niveau de tension et du type de réaction musculaire	62
18 Répartition des causes de la blessure ou du décès	65
19 Type de réaction musculaire dans les cas de chute.....	66
20 Causes des blessures subies par le travailleur.....	67
21 Causes du décès du travailleur.....	68
22 Causes de la blessure ou du décès pour les cas de projection ou de tétanisation ..	69
23 Répartition des cas de réaction inconnue/aucune en fonction de la source du rapport	72
24 Répartition des cas de projection en fonction de la source du rapport	74
25 Répartition des cas de tétanisation en fonction de la source du rapport	74
26 Répartition de la source du rapport pour les cas n'ayant entraîné aucune blessure.....	75
27 Répartition de la source du rapport pour les cas ayant entraîné des blessures au travailleur	76
28 Répartition de la source du rapport pour les cas ayant entraîné le décès du travailleur	76
29 Répartition du type de réaction musculaire en fonction du lieu de l'incident	79

Liste des tableaux

Tableau	Page
1	Conséquences en fonction de l'intensité du courant (tiré de Ross, 2011)3
2	Réactions musculaires.....28
3	Répartition de la fréquence des niveaux de tension observés.....30
4	Niveau de tension pour chaque type de réaction musculaire observée.....31
5	Type de réaction musculaire en fonction du niveau de tension33
6	Conséquences du choc électrique35
7	Conséquence de l'accident en fonction du type de réaction musculaire.....36
8	Conséquence de l'accident en fonction du niveau de tension.....37
9	Causes du décès ou des blessures subies par le travailleur40
10	Causes de la conséquence (blessure ou décès) en fonction du type de réaction musculaire observée41
11	Points d'entrée et de sortie du courant en fonction du type de réaction musculaire43
12	Régions du corps impliquées lors du choc électrique (points d'entrée et de sortie)44
13	Régions du corps impliquées en fonction du type de réaction musculaire45
14	Type de réaction musculaire observée en fonction de la source du rapport48
15	Conséquence de l'accident en fonction de la source du rapport50
16	Répartition de la cause en fonction de la conséquence (blessure ou décès)67

Résumé

L'objectif de cette recherche est de déterminer quels sont les facteurs qui peuvent influencer une réaction de tétanisation plutôt qu'une réaction de projection lorsque la victime subit un choc électrique. Une revue de la littérature existante sur le sujet est tout d'abord effectuée afin de déterminer l'étendue actuelle des connaissances dans le domaine. Certaines pistes de réponse sont avancées sans toutefois permettre d'en tirer des conclusions satisfaisantes. L'approche proposée consiste donc à analyser le contenu des rapports d'accidents de travail de nature électrique pour en tirer l'information voulue. Certaines limites quant aux types de sources disponibles sont énoncées. Les résultats sont évalués en utilisant le test du χ^2 avec un seuil de signification de $p=0,05$. Un total de 258 rapports ont ainsi été analysés, permettant de mettre en lumière certaines tendances dans les résultats, notamment en ce qui concerne l'impact du niveau de tension lors du choc électrique. Cependant, le faible nombre de cas de projection, de même que l'absence de situations correspondant à des chocs provoqués par du courant continu limitent la possibilité de tirer des conclusions sur plusieurs des facteurs considérés. Le contenu des rapports provenant des diverses sources ainsi que l'accessibilité à ces sources constituent des éléments pouvant potentiellement permettre d'accroître la portée ainsi que la pertinence des résultats obtenus dans le cas de recherches futures.

Introduction

Plusieurs personnes ont déjà subi un choc électrique : sensation d'un chatouillement plus ou moins intense ressenti au contact d'un objet mal isolé ou directement sur un fil électrique que l'on croyait hors tension. Selon l'intensité du courant circulant dans le conducteur au moment du contact, les effets sur le corps peuvent varier. Du simple chatouillement à l'arrêt cardiaque, les effets peuvent être sans conséquences, ou au contraire mortels.

Un des effets potentiels d'un choc électrique est la contraction des muscles squelettiques. Cette contraction peut entraîner des conséquences diverses, selon les muscles qui sont stimulés. Mais quels sont ces effets et qu'est-ce qui influence une conséquence plutôt qu'une autre? L'objectif de ma recherche consiste à définir quels facteurs feront en sorte que l'on se retrouvera dans l'une ou l'autre des situations.

Chapitre 1

Mise en contexte du problème

1.1 Historique des accidents

Les chocs électriques sont la 6^e cause d'accidents mortels reliés au travail aux États-Unis et ils représentent 5% des décès (Cawley et Homce, 2003). De 1992 à 2002, toujours aux États-Unis, 3378 travailleurs sont décédés des suites d'un choc électrique, ce qui représente une moyenne de 307 travailleurs par année (Bureau of Labor Statistics, 2007).

Les accidents de nature électrique sont généralement divisés en deux grandes catégories. D'une part, il y a les brûlures (externes) souvent causées par des explosions électriques (explosions provoquées par un court-circuit dans le système électrique) ou encore par la chaleur dégagée suite au contact avec un objet conducteur. D'autre part, il y a les chocs électriques; il s'agit ici de situations où il y a passage de courant à travers une partie du corps. C'est plus précisément ce type d'accident qui fera l'objet de la recherche.

1.2 Effets d'un choc électrique

Selon l'importance du courant absorbé lors du choc, les effets peuvent varier de manière importante. On peut parler de brûlures (internes ou externes), d'arrêt respiratoire, de fibrillation ventriculaire ou de d'autres types de blessures (fractures,

déchirures, etc.). La nature et la gravité de ces blessures varient de manière significative en fonction de différents facteurs. Ces facteurs sont notamment :

- L'intensité du courant
- Le temps d'exposition
- Le trajet que suit le courant à travers le corps
- Les paramètres personnels du sujet

Le tableau 1 présente un résumé des conséquences potentielles en fonction de l'intensité du courant. Bien entendu, il ne s'agit que d'une illustration à titre indicatif et les effets réels peuvent varier, notamment en fonction de la combinaison avec d'autres paramètres.

Tableau 1 Conséquences en fonction de l'intensité du courant (tiré de Ross, 2011)

300 mA	Brûlures
80 mA	Fibrillation ventriculaire
50 mA	Arrêt respiratoire
10 mA	Non-lâcher
3 mA	Douleur
1 mA	Perception

1.3 Effets sur la contraction musculaire

Dans le corps humain, les signaux envoyés par le système nerveux sont en partie de nature électrique. Les potentiels d'action qui dictent à nos muscles de se contracter en sont un exemple bien connu. Cependant, lorsque l'intensité d'un choc

électrique dépasse celle d'un potentiel d'action, le muscle se trouve alors stimulé par l'effet du choc électrique. La victime voit alors ses muscles se contracter malgré sa volonté; la réaction musculaire peut alors être différente, de même que ses conséquences, selon les muscles qui seront sollicités.

La première réaction, qui est la plus connue, est la réaction dite de tétanisation ou de non-lâcher (en anglais, *The Let-Go phenomenon*). Lorsque la victime subit un choc électrique, le courant circulant à travers le corps provoque une contraction des muscles fléchisseurs. Lorsque les muscles de la main sont ainsi stimulés, ils se contractent sur la source de courant (conducteur). L'intensité du courant provoquée par le choc étant supérieure à celle envoyée par le système nerveux qui lui permettrait de relâcher la prise, la victime ne peut se détacher du conducteur bien qu'elle soit parfaitement consciente de la situation. La durée d'exposition au choc s'en trouve alors augmentée, de même que les conséquences de celui-ci.

La seconde réaction possible survient lorsque ce sont les muscles extenseurs qui sont contractés. Dans ce cas, la victime se voit projetée loin de la source. La durée du choc est alors plus courte, et les conséquences directes s'en trouvent donc réduites. Cependant, cette projection peut entraîner d'autres effets, comme la chute de la victime. C'est pourquoi les blessures subies par un choc électrique lorsqu'il y a eu projection peuvent être aussi graves que celles où il y a eu tétanisation. Elles sont cependant parfois de nature différente.

1.4 La problématique

En consultant un document produit par l'Association Sectorielle Paritaire Métal Électrique (Ross, 2007) dans le cadre de mon travail comme coordonnateur en santé et sécurité, j'ai remarqué qu'on y mentionnait que le phénomène de projection lors

d'un choc électrique était peu documenté dans la littérature. Comme les accidents de nature électrique font partie des principaux risques auxquels sont exposés les travailleurs de l'entreprise qui m'emploie, cette affirmation a attiré mon attention et m'a incité à chercher à comprendre le phénomène.

Après avoir cherché de la documentation sur la différence entre l'effet de non-lâcher et la projection, force est d'admettre qu'effectivement, la littérature traitant de cette différence est plutôt rare. Elle se limite en général à affirmer que cette différence est liée au type de muscles (fléchisseurs ou extenseurs) qui sont sollicités ainsi qu'à la position de la main au moment du contact (Fish et Geddes, 2009b). Pour tenter de comprendre le phénomène, il est donc nécessaire de chercher de manière plus rigoureuse ou encore de proposer une approche qui permette de répondre à cette question.

Mais en fait, comment doit-on poser la question? Tout d'abord, il faut comprendre ce qui provoque le non-lâcher ou la projection. Ensuite, pourquoi dans certaines circonstances se retrouve-t-on avec un phénomène plutôt que l'autre? Y a-t-il des facteurs qui influencent l'apparition d'une situation plutôt que l'autre? Y a-t-il une différence lorsque le choc survient en courant alternatif plutôt qu'en courant continu? Et que se passe-t-il lors d'un choc statique?

1.5 Objectif et limites de la recherche

L'objectif de ma recherche était de différencier les situations où on se retrouve en présence de téτανisation ou de projection. Je cherchais à déterminer les facteurs personnels et environnementaux, incluant les facteurs techniques, qui favoriseront l'une ou l'autre des situations.

La méthode idéale pour comprendre le phénomène aurait été de prendre des mesures directement sur des sujets. Cependant, étant donné les risques associés (notamment en raison du niveau de tension nécessaire), il n'était pas envisageable d'effectuer des tests sur des personnes. Les risques potentiels étant trop grands, on ne peut mettre la vie des sujets en jeu.

La recherche se devait donc d'être théorique. Le but étant de comprendre le phénomène de contraction musculaire lors d'un choc électrique, j'ai commencé par effectuer une analyse de la littérature afin de comparer les données recueillies et dresser un portrait de l'état des connaissances dans ce domaine. À partir de ces informations, j'ai pu mieux expliquer le phénomène et déterminer quels sont les facteurs qui favorisent une situation ou l'autre.

La littérature qui traite directement de la différence entre la téτανisation et la projection lors d'un choc électrique est rare, et il est difficile de démontrer ce qui provoque cette différence simplement à partir d'une revue de littérature. C'est pourquoi une autre approche a été utilisée pour déterminer ce qui peut différencier ces deux phénomènes. Cette approche consiste à analyser les causes d'accidents de nature électrique, telles que décrites dans les rapports d'accidents provenant de différentes sources.

1.6 Intérêt de la recherche et motivations personnelles

Depuis 2008, je travaille comme coordonnateur en santé et sécurité pour ABB, une grande entreprise du domaine de la fabrication d'équipements électriques. Au cours de ces années, plusieurs accidents impliquant des chocs électriques sont survenus dans différentes usines d'ABB à travers le monde. Ces incidents, de même que la série de mesures nécessaires pour éviter qu'ils se répètent, ont éveillé chez moi

un intérêt pour mieux comprendre les impacts subis par le corps humain lors d'un choc électrique.

Cette suite d'incidents constitue l'élément déclencheur de mon sujet de recherche. Idéalement, si l'apport de nouvelles connaissances pouvait le permettre, j'aimerais que cette recherche puisse provoquer la mise en place de mesures qui permettraient d'améliorer la sécurité des employés ayant à travailler avec ou à proximité de l'électricité.

Chapitre 2

Cadre théorique

2.1 Notions de base d'électricité

Avant d'aborder les notions spécifiques au passage du courant dans le corps humain, il convient de rappeler quelques notions de base d'électricité. Les définitions qui suivent sont tirées du manuel Électricité et magnétisme (Serway, 1989)

Le courant électrique

Le courant électrique est généré par le déplacement des électrons dans un conducteur. La valeur du courant correspond au nombre d'électrons (mesuré en Coulombs) passant dans un conducteur par unité de temps (en secondes). L'unité de mesure du courant est l'Ampère (A). Un courant de 1 ampère représente cependant une valeur relativement importante, surtout lorsqu'on considère le courant circulant dans le corps (voir le tableau 1). Pour cette raison, nous nous exprimerons généralement en milliampères (mA), qui représentent un millième d'Ampère.

La tension

La tension est définie comme étant la différence de potentiel entre deux points. C'est cette différence de potentiel qui provoquera le mouvement des électrons et par le fait même, le passage du courant. La tension est mesurée en Volts.

La résistance ou impédance

La résistance, comme son nom l'indique, représente l'opposition que présente un conducteur au passage du courant. Plus un conducteur a une résistance élevée, plus faible sera le courant circulant dans celui-ci. On parle en général de résistance ou d'impédance lorsqu'on est en courant alternatif, et de résistivité lorsqu'on est en courant continu.

Courant continu

Courant électrique dont la valeur est constante dans le temps.

Courant alternatif

Courant dont la valeur change dans le temps de manière continue. Le courant alternatif change à un rythme régulier défini par sa fréquence (en général, 60Hz pour l'Amérique du Nord).

Fréquence

Rythme d'alternance du courant alternatif. La fréquence est définie par le nombre de cycles par seconde et l'unité de mesure est le Hertz (Hz)

Loi d'Ohm

La loi d'Ohm définit la relation existant entre les valeurs du courant, de la tension et de la résistance. Elle permet de déduire une valeur en connaissant les 2 autres. Par exemple, lorsqu'on sait à quelle tension était soumis un individu et qu'on connaît les conditions dans lesquelles s'est produit un accident (et qu'on peut estimer la résistance de la peau, des vêtements, etc.), on peut en déduire la valeur du courant ayant traversé son corps. La loi d'Ohm est définie par la relation suivante :

$$V = R * I$$

2.2 Effets du courant sur le corps humain

La littérature existante concernant les effets d'un choc électrique sur le corps humain est assez abondante. Ces effets sont documentés dans plusieurs ouvrages dont l'un des principaux est le rapport de la norme CEI 479-1 (IEC/TS 60479-1, 2005). Ce rapport définit l'impact de certains facteurs pouvant influencer l'effet d'un choc électrique sur le corps humain, notamment la durée du contact, l'amplitude du courant, le passage du courant, le courant alternatif VS le courant continu, etc. Ces effets sont résumés dans différents tableaux et graphiques. La norme CEI 479-2 (CEI 479-2, 1987) donne suite aux énoncés de la précédente en traitant des effets du courant lors de son passage dans le corps humain.

Élément important à préciser : La loi d'Ohm ($V=R*I$) démontre une relation linéaire entre le courant et la tension pour une résistance donnée. Dans son rapport sur les Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques, l'IEC mentionne que « La relation entre le courant et la tension n'est pas linéaire du fait que l'impédance du corps humain varie avec la tension de contact. » (IEC/TS 60479-1, page 69) Cela signifie donc qu'il faut être prudent lors de l'interprétation des résultats : Si on peut calculer une valeur de courant lorsqu'on connaît avec certitude la tension et l'impédance, il n'est pas possible d'extrapoler les résultats en supposant que cette valeur de l'impédance est constante. Cette mise en garde se limite toutefois à des tensions de contact faibles. Au-delà d'un certain niveau, l'impédance du corps humain atteint un certain plateau et ne varie plus vraiment en fonction de la tension.

Les connaissances présentées dans la littérature se divisent généralement en deux grandes catégories : celles qui touchent la stimulation des muscles squelettiques, que l'on retrouve notamment dans plusieurs ouvrages traitant d'électrophysiologie

(Benton, Baker, Bowman et Waters, 1980; Snyder-Mackler, 1989), et celles qui touchent les effets sur les systèmes cardiaque et respiratoire (Fish et al., 2009b).

Les effets d'un choc électrique sur les systèmes cardiaque et respiratoire sont sans aucun doute les plus connus et les mieux documentés. Une multitude d'études ont déjà traité de ces effets et ceux-ci sont donc assez bien compris (Fish et al., 2009b; Geddes, Bourland et Ford, 1986). On peut résumer le tout ainsi: la stimulation cardiaque est basée sur une succession de signaux électriques qui permettent au cœur de battre d'une manière synchronisée. Si un signal électrique externe vient s'introduire dans cette séquence, la régularité du battement cardiaque s'en trouve compromise. Lorsqu'un tel signal dure un certain temps, ou encore s'il s'introduit durant la phase critique (essentiellement, durant la dépolarisation ventriculaire), le cœur peut alors entrer en fibrillation ventriculaire, ce qui peut entraîner la mort de la victime. Cet aspect de l'impact d'un choc électrique n'étant pas le sujet de la présente recherche, je n'irai pas plus loin dans l'explication de ce phénomène.

Les effets du courant électrique sur la stimulation musculaire sont eux aussi assez bien connus. Mais avant de voir l'effet d'un choc « externe », voyons rapidement ce qui se produit lors d'une contraction musculaire volontaire tel que décrit par Marieb (1999).

Lors de la contraction d'un muscle squelettique, un potentiel d'action (variation de potentiel) est transmis le long des neurones moteurs jusqu'à la terminaison axonale. La diffusion de l'acétylcholine (un neurotransmetteur libéré sous l'effet du potentiel d'action) de la terminaison axonale jusqu'au sarcolemme de la fibre musculaire, entraîne une dépolarisation du sarcolemme. Le potentiel d'action ainsi créé entraîne la libération d'ions calcium, lesquels provoquent la contraction musculaire en démarrant le cycle de glissement des filaments d'actine et de myosine.

Lorsqu'une personne subit un choc électrique, le courant électrique circulant à travers le corps atteint les neurones moteurs, provoquant leur dépolarisation. Ceux-ci transmettent ce potentiel jusqu'aux fibres musculaires, ce qui entraîne la contraction des muscles. Comme la différence de potentiel générée lors de la transmission d'un potentiel d'action « volontaire » est très faible (de l'ordre d'environ 100mV), même un potentiel externe de faible intensité pourra se substituer au potentiel d'action volontaire et entraîner une contraction musculaire involontaire. C'est pourquoi, contrairement à la croyance populaire, même le fameux 110 volts que nous côtoyons quotidiennement peut être très dangereux.

Lors d'une situation où une personne, les mains humides (résistance du corps main à main d'environ 1000 ohms (Fish et al., 2009b)), entre accidentellement en contact avec un conducteur soumis à une tension de 110 volts, la loi d'Ohm mentionne que dans une telle situation :

$$\begin{aligned} I &= V / R \\ I &= 110 \text{ volts} / 1000 \text{ ohms} \\ I &= 0,110 \text{ Ampère ou } 110 \text{ milliampères} \end{aligned}$$

Le tableau 1 montre que non seulement cette valeur dépasse largement le seuil de non-lâcher nécessaire pour une réaction de téτανisation mais qu'en plus elle dépasse les seuils requis pour des réactions d'arrêt respiratoire ou de fibrillation ventriculaire, lesquelles peuvent toutes deux entraîner le décès de la victime

L'explication des phénomènes liés à la transmission des signaux électriques à travers le corps a été revue à partir d'ouvrages traitant de ces sujets. Le livre de Marieb (1999) m'a notamment permis de comprendre l'ensemble des principes physiologiques impliqués dans la contraction musculaire. L'ouvrage d'Astrand, Rodahl, Dahl et Stromme (2003) précise cette information en décrivant un peu plus

en détail le fonctionnement du système moteur. Finalement, l'ouvrage de Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, LaManita, McNamara et Williams (2005) m'a permis de compléter cette information en traitant en détail du fonctionnement du système nerveux.

L'électrostimulation est une technique qui s'est développée, autant pour des motifs médicaux (réadaptation suite à des accidents ou maladies) que pour des motifs liés à l'entraînement des athlètes. Il est possible en effet de stimuler directement certains muscles à l'aide d'appareils conçus à cet effet. Afin de comprendre l'effet de la stimulation électrique sur les muscles, l'électrostimulation a été revue en bonne partie elle aussi par la consultation d'ouvrages sur le sujet. Des ouvrages tels que *Clinical Electrophysiology* de Snyder-Mackler et Robinson (1989), de même que *Functional Electrical Stimulation – A Practical Guide* de Benton, Baker, Bowman et Waters (1980) ont en effet permis de bien comprendre les techniques employées et de préciser une partie des informations recueillies plus tôt.

Une fois compris le fonctionnement de la transmission des signaux électriques dans le corps humain, il convient de vérifier dans quelle mesure la science a déjà abordé le sujet de la contraction musculaire lors d'un choc électrique. Il y a en effet une très grande différence entre la stimulation électrique - qui se fait sur des muscles déterminés, avec des effets prévisibles et dans un environnement contrôlé - et un choc électrique - où tous les paramètres sont « hors contrôle ». Dans ce dernier cas, on ne connaît pas l'intensité du courant, on ne sait pas quels muscles seront stimulés et les facteurs environnementaux pouvant avoir un impact sur la réaction ne sont pas contrôlés.

Certains auteurs ont déjà abordé le sujet de la contraction musculaire provoquée par un accident électrique. C'est le cas notamment de Charles Dalziel qui a écrit plusieurs articles au milieu du siècle dernier sur le « *Let-go phenomenon* »

(Dalziel, 1956). Plus récemment, Raymond Fish et Leslie Geddes (Fish et al., 2009b) ont repris certains des travaux de Dalziel pour pousser l'analyse un peu plus loin en écrivant plusieurs articles et ouvrages sur les effets du courant électrique sur le corps humain. Ces auteurs ont donc formé le noyau central de la partie revue de littérature qui a été effectuée.

Chapitre 3

Méthodologie

Bien qu'il soit possible de regrouper un certain nombre d'informations sur le sujet à travers la littérature, il est difficile de répondre de manière claire et complète à la question posée par cette recherche. Dès lors, une autre approche s'avère nécessaire. À travers des études de cas d'accidents de nature électrique, je cherchais donc à démontrer si certains critères permettent de déterminer quel type de situation (tétanisation ou projection) sera rencontré lorsque survient un choc électrique. À noter qu'afin de valider si les résultats sont statistiquement significatifs, le seuil de $p < 0,05$ sera utilisé.

Les sources de documentation concernant les accidents de nature électrique sont de deux ordres. D'abord, il y a les sources de nature corporative. Il s'agit de rapports d'accidents ou de données statistiques traitant des cas d'accidents de travail. Dans ce cas, les rapports d'incidents viennent directement de l'entreprise où est survenu l'accident.

La seconde source d'information est gouvernementale. Comme plusieurs pays possèdent un organisme qui gère les aspects liés à la santé et à la sécurité sur leur territoire, ces organismes possèdent beaucoup d'informations concernant les événements graves. Dans plusieurs cas, les rapports d'incident sont même disponibles sur leur site web, ce qui permet de recueillir facilement un nombre important de ces rapports et d'en compiler les informations. Ce sont principalement ces sources qui ont été utilisées pour cette recherche.

3.1 Sélection des cas étudiés

Les sources gouvernementales sont en théorie nombreuses. Plusieurs pays à travers le monde compilent les informations relatives aux accidents de travail. Plusieurs organismes gouvernementaux publient également des données sur ces accidents, incluant des rapports dépersonnalisés des événements. Ces rapports contiennent plusieurs informations qui peuvent être utilisées dans le cadre de la présente recherche. Le choix des sources retenues reposait au départ sur deux facteurs principaux : La connaissance du cadre légal (soit l'ensemble des lois et règlements applicables en matière de santé-sécurité ainsi qu'au niveau des normes encadrant le travail avec l'électricité) dans lequel œuvrent les organismes liés à la santé-sécurité, et l'accessibilité de la langue (seules les bases de données disponibles en anglais et en français ont été recherchées).

Comme il s'agit d'un organisme local, la première source utilisée a été la banque de données de la Commission de la Santé et de la Sécurité au Travail ou CSST (Commission de la Santé et de la Sécurité du Travail, 2013), organisme qui gère le domaine de la santé et de la sécurité au Québec. La seconde source est celle du programme FACE (*Fatal Accident Circumstances and Epidemiology*) de la *National Institute for Occupational Safety and Health* ou NIOSH (*Centers for Disease Control and Prevention*, 2012), qui couvre les États-Unis d'Amérique. D'autres sources ont également été envisagées dans la poursuite de l'étude. Il s'agit des bases de données provenant des autres provinces canadiennes (Ontario, Colombie-Britannique), de la France, de la Belgique, de l'Australie et de l'Angleterre. Toutefois, certaines contraintes rencontrées en cours de route en ont limité l'accès dans le cadre de cette recherche.

3.2 Contraintes lors de la consultation des bases de données

La première de ces contraintes concerne les sources corporatives. La plupart des entreprises (et à ma connaissance, toutes les grandes entreprises) compilent les informations relatives aux accidents de travail survenus à leurs employés. Comme certaines de ces entreprises œuvrent dans des domaines liés à l'électricité (notamment les entreprises telles qu'Hydro-Québec, et Hydro-Ontario), il s'agissait d'une source d'information potentiellement intéressante. Cependant, aucune de ces entreprises n'a accepté de divulguer les informations relativement aux accidents de nature électrique. Dans certains cas, on évoquait la confidentialité alors que dans d'autres, on disait que les travailleurs suivaient des procédures rigoureuses et portaient des équipements de protection ce qui faisait en sorte que l'entreprise n'avait pas d'historique d'accidents de cette nature (ce qui en passant était complètement faux puisque des accidents survenus à des employés de ces entreprises ont été retrouvés dans les banques de données gouvernementales). En fait, un document m'a été envoyé par l'une de ces entreprises, mais l'information qu'il contenait était beaucoup trop sommaire pour être utilisable.

Comme l'information ne pouvait être obtenue de la part des entreprises, je me suis donc tourné vers des organismes professionnels afin d'obtenir l'information recherchée. J'ai contacté la Corporation des maîtres électriciens (Québec) ainsi que l'Association canadienne des maîtres électriciens. Dans les deux cas j'ai dû faire face à un refus, soit en raison de la nature confidentielle des informations ou encore de l'absence d'information relative au sujet recherché.

Du côté gouvernemental, la recherche n'a pas été plus fructueuse. Outre les sources identifiées lors de l'avant-projet (CSST et NIOSH), les autres sources n'ont

données aucun résultat. L'organisme ontarien de gestion de la santé et de la sécurité au travail (WSIB) a été contacté directement mais encore une fois, on a invoqué la confidentialité pour mentionner que l'information ne pouvait être disponible. Les recherches sur le site web de l'organisme n'ont pas non plus données de résultats. J'ai aussi tenté ma chance du côté de la France et de l'Australie en contactant des collègues de chez ABB travaillant dans le domaine de la santé et de la sécurité au travail dans ces deux pays. À leur connaissance, aucune base de données similaire à celles trouvées avec la CSST et NIOSH n'existe dans leurs pays.

3.3 *Choix des rapports*

Au niveau corporatif, la seule source disponible était donc l'entreprise pour laquelle je travaillais¹. En incluant les cas dont j'avais personnellement eu connaissance, la consultation du site Intranet de l'entreprise a permis de recueillir au total 17 cas d'accidents de nature électrique et impliquant une possible réaction musculaire. Ceci exclut les cas où l'accident était de nature « Arc électrique », cas n'ayant pas été retenus (j'y reviendrai dans un instant).

Du côté des sources gouvernementales, une fois les sources identifiées, le nombre de rapports disponibles est énorme, et tous ne concernent pas le sujet à l'étude. Une sélection devait donc être faite. Comme dans le cas des sources corporatives, pour qu'un cas d'accident fasse l'objet d'un rapport officiel sur le site de l'une des sources gouvernementales, il doit s'agir d'un accident grave, voir mortel. En effet, seuls ceux-ci font l'objet d'un rapport officiel, généralement effectué par un inspecteur de l'agence en question. La gravité de l'accident constitue donc le premier critère retenu.

¹ Entreprise ABB : Accès privilégié et confidentiel aux rapports d'accidents de travail

Les rapports paraissant dans les bases de données consultées ne sont pas tous pertinents à l'étude. Certains cas ont donc été éliminés pour ne garder que ceux qui touchent le sujet étudié; Ces cas se limitent aux accidents de nature électrique. Ne sont donc pas considérés, tous les cas d'accidents d'autres sources, par exemple, liés à la sécurité des machines, au travail en hauteur, au travail en espace clos, etc., à moins que l'électricité n'ait un rôle à jouer dans l'accident.

Le fait qu'un accident soit survenu à la suite d'un événement impliquant l'électricité ne garantit pas pour autant sa pertinence par rapport au sujet étudié. Il existe en effet une catégorie d'accident que l'on peut nommer les accidents d'Arc électrique ou d'explosion électrique. Il s'agit ici d'accidents où est survenue une explosion de nature électrique et où le travailleur a été brûlé à différents degrés. Comme il n'y a pas nécessairement eu de contact du travailleur avec l'électricité, et par conséquent pas d'effet sur la contraction musculaire, ce type d'accident n'a pas été retenu pour les fins de la recherche.

Les cas répertoriés provenant de la CSST ont été obtenus sur le site du Centre de documentation de la CSST, accessible par la page d'accueil du site web de la CSST (2013). En cliquant sur le lien « Accès au catalogue Information SST », on peut effectuer une recherche sur l'ensemble des documents que possède la CSST. En effectuant une recherche spécifique dans la collection « Enquête », on accède à une banque de données regroupant 3793 rapports d'enquête (en date du 19 février 2013), dont certains remontent jusqu'à 1977. En raffinant cette recherche en sélectionnant « Accident électrique » comme sujet principal (toujours dans la collection « Enquête »), on réduit à 467 le nombre de rapports à étudier. Ce sont ces rapports qui ont servi de base à mon analyse.

Parmi les rapports disponibles, seuls les 167 premiers étaient accessibles en ligne, les autres nécessitant une demande auprès de la CSST. Ce sont donc ces 167

rapports qui ont été utilisés dans la présente étude. De ce nombre, certains n'ont pas été retenus, leur contenu n'étant pas en lien avec le sujet recherché (par exemple, des cas d'arc électrique). 113 cas provenant de cette base de données ont ainsi été retenus.

Dans le cas de NIOSH, la recherche a été effectuée sur le site du programme FACE décrit précédemment (*Centers for Disease Control and Prevention*, 2012). On accède ainsi au site du « *Fatality and Control Evaluation Program* », qui regroupe les rapports des accidents du travail fatals survenus à travers les États-Unis. De là, deux options sont disponibles : La première consiste à sélectionner le programme NIOSH FACE Reports. Ce programme, amorcé en 1982, contient 610 rapports d'accidents fournis par les états participants au sujet de certains types d'accidents mortels spécifiques. Ce programme contient (pour les accidents de nature électrique) des rapports émis entre 1982 et 2005. Une recherche plus spécifique effectuée en filtrant uniquement les cas classés comme « *Electrocution* » réduit ce nombre à 229 cas. La seconde option (State FACE Reports) contient elle aussi des rapports émis par les états participants. Les rapports étant classés par État, le nombre total est difficile à évaluer mais un filtre limitant la recherche aux cas classés comme « *Electrocution* » ramène ce nombre à 144. Pour les accidents de nature électrique, les rapports ont été émis entre 1990 et 2008. Tous ces rapports n'ont cependant pas été utilisés; Étant donné le nombre, certains ont été retenus pour l'étude et les autres laissés de côté. Il est à noter que les cas retenus n'ont pas été sélectionnés selon des critères quelconques. Le choix des rapports retenus s'est fait tout simplement en fonction de l'ordre d'apparition dans la liste, en partant du plus récent et en reculant dans le temps.

3.4 Grille d'analyse

Une grille d'analyse a été créée afin de regrouper les informations provenant des rapports d'accidents. Cette grille comporte un certain nombre d'éléments qui, dans le cas d'un accident électrique, sont susceptibles d'influencer le type d'accident survenu. Ultiment, la recherche vise à identifier parmi ces critères lesquels ont un impact sur le type de réaction musculaire. Quelques critères identifiés dans la grille ont aussi été ajoutés à titre descriptif, notamment dans le but de recueillir certaines informations sur les circonstances de l'accident, sur le travailleur impliqué ou tout simplement pour permettre de caractériser les événements.

Certaines informations recueillies le sont à titre informatif et permettent de situer l'accident dans le contexte où il est survenu. D'autres sont des éléments purement techniques en rapport direct avec l'accident en cause. Malheureusement, certains des critères utilisés, qu'ils soient techniques ou informatifs, sont absents dans certains rapports. Il n'a donc pas été possible d'avoir un portrait parfait, où chaque cas analysé comporte exactement le même nombre de paramètres. Voici donc la liste des informations composant la grille d'analyse.

Provenance

C'est la source de laquelle est tiré le rapport en question. Il s'agit principalement des rapports de la CSST, de NIOSH ou d'ABB. Quelques cas trouvés provenant de d'autres sources ont été identifiés dans la catégorie « Autre » (NOAA Small Boat Program, s.d.; WorksafeBC, 2013).

La date

La date de l'événement est utilisée à titre indicatif pour identifier de quel événement il s'agit. Les rapports consultés sont ceux répertoriés sur le site web des sources utilisées. Nous sommes donc limités par l'archivage qui est fait dans les bases de données en question. Dans le cas de la CSST, les rapports d'accidents consultés remontent à l'année 2000. C'est donc dire que tous les cas étudiés proviennent de rapports d'accidents survenus entre les années 2000 et 2010.

Dans le cas de NIOSH, les rapports d'accidents disponibles sur le site web de l'organisme remontent au début des années 80. En effet, même les rapports publiés avant la venue d'internet ont été archivés dans la base de données de l'organisme. Un nombre considérable de rapports sont donc disponibles via cette base de données. Toutefois, les rapports les plus anciens utilisés datent au plus de 1988.

Entreprise

Le nom de l'entreprise est à titre purement informatif. Cette information n'est pas toujours disponible. En général, les rapports provenant de la CSST fournissent cette information alors qu'elle n'est pas disponible sur ceux provenant de NIOSH.

Ville – Province – État

Cette information est d'abord à titre informatif, afin de nous permettre de situer le contexte de l'accident. Elle peut toutefois avoir une certaine importance, notamment si elle est combinée avec la date de l'événement en déterminant le contexte climatique de l'événement.

L'information sur le lieu géographique est toujours mentionnée dans les rapports consultés. Cependant, la précision de l'information n'est pas la même selon les sources utilisées.

Lieux (intérieur/extérieur)

L'endroit où s'est produit l'événement peut avoir un impact sur les conditions dans lesquelles s'est produit l'accident. C'est pourquoi j'ai jugé important de préciser cette information afin de voir si elle peut influencer le type d'accident.

Facteur climatique particulier

En lien direct avec l'élément précédent, le facteur climatique peut déterminer dans quelle mesure certains facteurs environnementaux peuvent avoir influencé le déroulement des événements et la nature de l'accident. Par exemple, la pluie, une chaleur importante, la neige, etc.

Nombre de travailleurs

Surtout à titre indicatif. Toutefois, certains des rapports analysés comptaient plus d'une victime pour lesquelles les conséquences ou les circonstances de l'accident n'étaient pas toujours les mêmes.

Résultat (blessure/décès)

Cet élément important témoigne de la gravité de la blessure subie par le travailleur. Cependant, comme cela a été mentionné, seuls les événements graves ou

dont le potentiel aurait pu l'être sont répertoriés. Dans le cas de NIOSH, la base de données consultée s'intitule FACE Program (*Fatality Assessment and Control Evaluation Program*). De par sa nature, elle répertorie uniquement les cas où il y a eu décès du travailleur. Les résultats obtenus seront donc forcément influencés. La CSST répertorie quant à elle des cas où il y a eu blessure sérieuse, mais pas forcément décès. Quelques rares cas traitent de situations où aucune blessure n'a été subie par le travailleur. Dans ces cas, c'est la gravité potentielle de l'événement qui a justifié le rapport.

Type (projection – Tétanisation)

Il s'agit de l'élément de base de la recherche. Cette information est précisément celle que je cherche à connaître pour déterminer lesquels des autres facteurs énumérés peuvent l'influencer. Cependant, il est très souvent difficile d'obtenir cette information. Lors de la majorité des accidents, il n'y a pas eu de témoin direct de l'événement au moment précis de l'incident. Comme personne n'a pu juger de ce qui s'est passé au moment où le travailleur entrait en contact avec la source de courant électrique, l'information est généralement absente du rapport d'accident. Dans certains cas, il est possible de déduire ce qui s'est produit de par la reconstitution des événements.

Voltage

Cet élément est probablement le point principal qui peut influencer le type de réaction observée. Cette information est pratiquement toujours disponible, à moins que le choc ne soit causé par un courant induit, auquel cas seule une estimation pourra être faite.

Ampérage

Idéalement, cet élément devrait être celui qui nous intéresse le plus et qui influence réellement le type de contraction musculaire observée. Cependant, les sources avec lesquelles les travailleurs entrent en contact sont habituellement données en Volts. Le courant étant fonction de la résistance du travailleur (selon la loi d'Ohm $V=RI$), le courant circulant à travers le corps peut varier et n'est donc pas disponible. Seuls quelques rapports donnent une estimation du courant auquel le travailleur accidenté a été exposé à partir d'une évaluation de la résistance de celui-ci. Pour cette raison, les facteurs environnementaux sont notés afin de déterminer si ceux-ci peuvent avoir eu une influence sur le courant.

Cause

Il s'agit de la cause du décès ou de l'accident, telle que définie par le médecin légiste ou le rapport d'événement. Même si un travailleur est soumis à un choc électrique, la cause du décès peut être différente (par exemple, une chute suite au choc).

Âge, Expérience, Sexe, Origine Ethnique, Formation

Ces paramètres personnels au travailleur peuvent influencer autant son comportement que sa résistance personnelle suite au choc. Elles peuvent donc influencer dans une certaine mesure les événements qui se sont produits. Cependant, pour des raisons de droit et de confidentialité du dossier, la CSST ne fournit pas ces informations. Seuls les rapports provenant de NIOSH permettent d'utiliser une telle information.

Entrée et Sortie du courant

Le parcours du courant a une influence directe sur la gravité et les conséquences de l'accident. Il peut aussi influencer la réaction musculaire engendrée par le choc. Bien qu'elle ne soit pas toujours disponible explicitement, cette information peut souvent être déduite. Elle représente un élément important dans le contexte de la recherche.

Activité lors de l'accident

Cet élément permet de préciser quel type d'activité effectuait le travailleur au moment de l'accident. On cherche à connaître plus précisément quelle était l'action posée lorsqu'est survenu le choc électrique

Commentaires

Toute autre information qui peut s'avérer pertinente dans le cadre de la recherche

Toutes les sources utilisées permettent un accès aux rapports dépersonnalisés des cas d'accidents. Comme le nom des personnes n'est d'aucun intérêt pour l'analyse, cette limite ne présente pas un obstacle à la recherche

Chapitre 4

Résultats

Les résultats compilés lors de l'analyse des rapports d'accidents de travail ont été comptabilisés dans la matrice décrite au chapitre précédent et présentée en annexe. Ces résultats seront décrits plus en détails dans les pages qui suivent. La validation statistique a été effectuée avec les tests mentionnés dans le texte en utilisant les références fournies par le manuel de Siegel (1956).

Tel que mentionné plus tôt, différentes sources ont été utilisées pour recueillir les rapports servant à effectuer cette analyse. La figure 1 présente cette répartition.

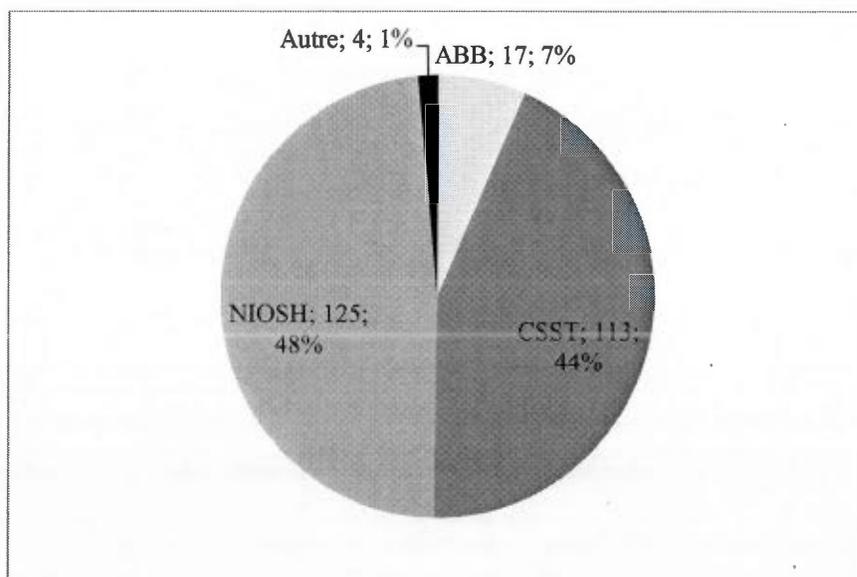


Figure 1 Répartition de la provenance des rapports analysés

Suite à la cueillette des données, certaines informations qui avaient été comptabilisées ont été laissées de côté. Plusieurs raisons peuvent expliquer ces choix. Tout d'abord, comme cela a déjà été mentionné, certaines informations ne se retrouvent que dans certains rapports spécifiques. Comme les données ne sont pas toujours connues, il devenait difficile de les utiliser pour dresser un portrait d'ensemble. D'autres informations qui paraissaient pouvoir être utiles de prime abord se sont révélées peu intéressantes ou difficiles à interpréter. Elles ont donc été laissées de côté. C'est le cas par exemple de la formation, de l'âge ou de l'expérience du travailleur.

4.1 Réaction musculaire

Le tableau 2 présente la répartition des cas selon le type de réaction musculaire observée. La figure 2 présente ces mêmes résultats sous forme d'histogramme. Le test du khi2 ($\chi^2=129$ pour 4 dl) montre que les résultats ne sont pas liés à une répartition aléatoire des données ($p<0,05$).

Tableau 2 Réactions musculaires

Type (proj-tét-inconnu)	Total
Aucune	40
Inconnu	137
Projection	16
Tétanisation	67
Total général	258

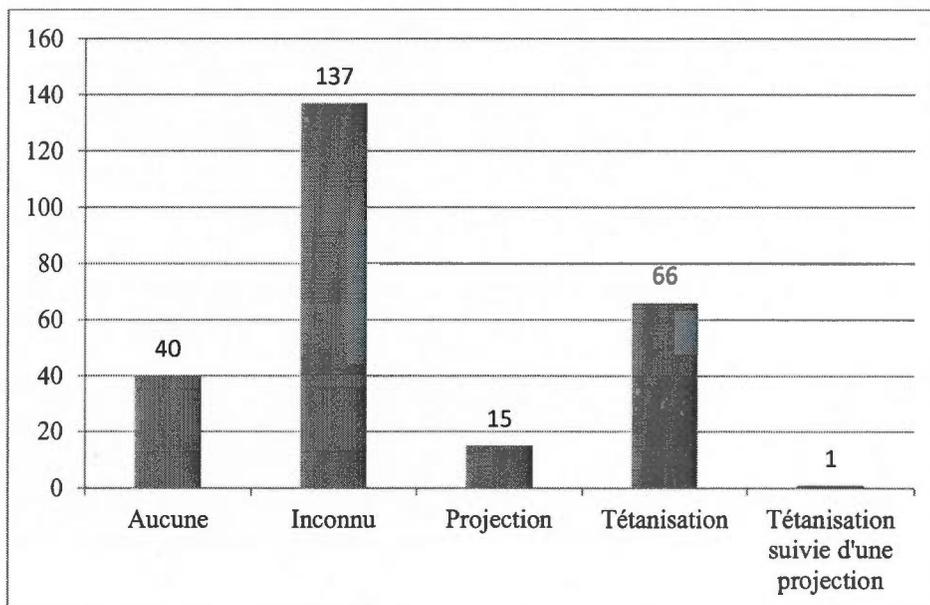


Figure 2 Réaction musculaire

Les résultats présentés à la figure 2 constituent le point de départ de l'étude. La plupart des résultats qui suivent tenteront d'expliquer quels phénomènes peuvent expliquer les résultats exposés dans cette figure.

Le tableau 4 et la figure 3 présentent le niveau de tension impliqué pour chaque type de réaction musculaire. Afin de rendre les données plus compréhensibles, les niveaux de tension observés ont été regroupés en trois catégories : moins de 1 000 volts (basse tension), 1 000 à 10 000 volts (moyenne tension) et 10 000 volts ou plus (haute tension). La répartition des cas observés pour chacune de ces catégories est donnée au tableau 3.

Tableau 3 Répartition de la fréquence des niveaux de tension observés

Niveau de tension	Fréquence	Proportion
Inconnu	12	4,6%
Moins de 1 000 volts	101	38,8%
Entre 1000 et 10000 volts	58	22,3%
Plus de 10 000 volts	89	34,2%

Le test du Chi² sur les données du tableau 3 donnent un $p < 0.001$ et montre que cette répartition des données n'a rien d'aléatoire. C'est ce tableau qui servira de référence pour certaines des analyses présentées dans les chapitres suivants.

Le choix de ces catégories vient de la ségrégation utilisée chez ABB pour traiter de la haute tension. En effet, ABB définit comme haute tension tout ce qui excède un niveau de 1 000 volts, tout ce qui se retrouve sous ce niveau étant par conséquent considéré comme de la basse tension. Toutefois, pour permettre une meilleure interprétation des résultats, une troisième catégorie a été ajoutée permettant de séparer la catégorie haute tension en deux, soient moyenne et haute tension. La consultation de références sur les installations électriques, notamment les classifications utilisées par Hydro-Québec (Hydro-Québec, 2013) donne une classification différente de celle utilisée ici. Toutefois, ces classifications ne permettaient pas une interprétation adéquate des résultats obtenus. C'est pourquoi une classification différente a été utilisée.

Dans un but d'interprétation des résultats, la situation décrivant une tétanisation suivie d'une projection apparaissant à la figure 2 a été inscrite dans chacune des deux catégories (projection et tétanisation) dans le tableau 2. C'est de cette façon que seront présentés la plupart des résultats qui suivent. Toutefois, dans

certaines situations, le fait que les deux types de réaction musculaire soient survenus durant le même incident en compliquait l'interprétation. Dans ces situations, les résultats de cet incident ont été ignorés.

Tableau 4 Niveau de tension pour chaque type de réaction musculaire observée

Type (proj-tét-inconnu)	Groupe voltage	Total
Aucune	INCONNU	3
	Moins de 1 000 volts	14
	Entre 1000 et 10000 volts	6
	Plus de 10 000 volts	17
Total Aucune		40
Inconnu	INCONNU	8
	Moins de 1 000 volts	49
	Entre 1000 et 10000 volts	32
	Plus de 10 000 volts	48
Total Inconnu		137
Projection	INCONNU	0
	Moins de 1 000 volts	2
	Entre 1000 et 10000 volts	4
	Plus de 10 000 volts	10
Total Projection		16
Tétanisation	INCONNU	1
	Moins de 1 000 volts	36
	Entre 1000 et 10000 volts	16
	Plus de 10 000 volts	14
Total Tétanisation		67
Total général		260

Les données du tableau 4 montrent une valeur de $\chi^2 = 19,68$ pour 9 dl, et donc $p=0,02$ ce qui signifie qu'il y a 98% des chances que le niveau de tension ait réellement un impact sur le type de réaction musculaire.

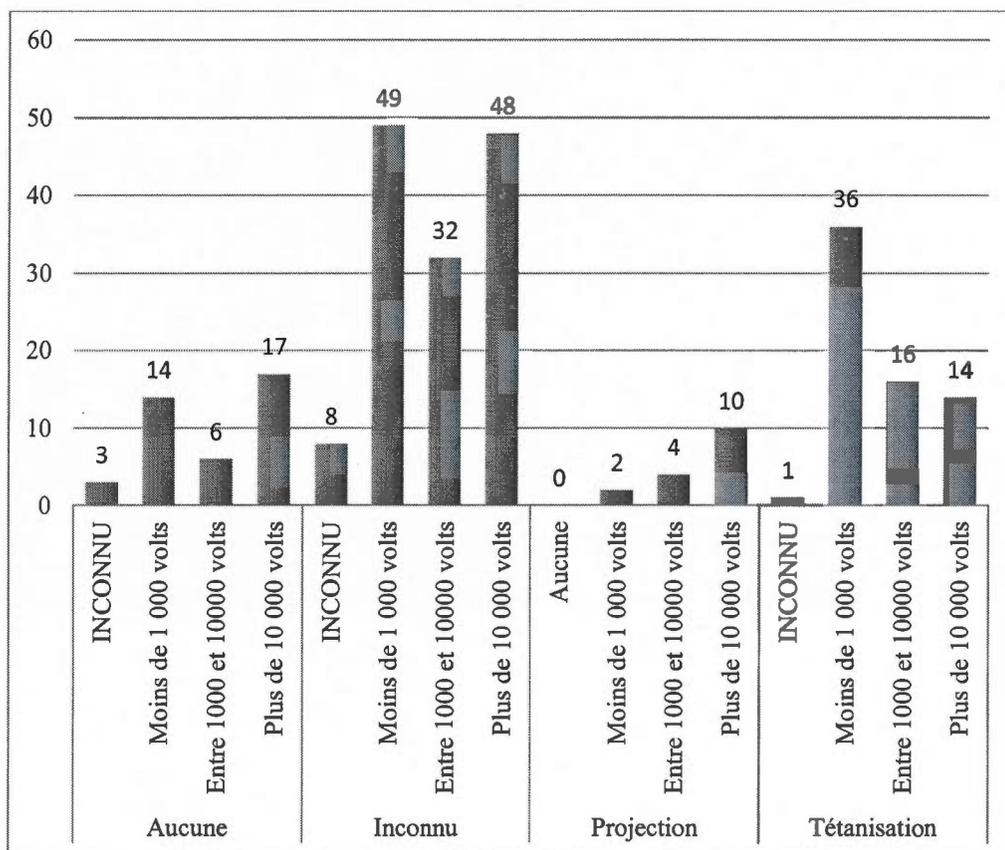


Figure 3 Niveau de tension pour chaque type de réaction musculaire

Après avoir comparé le niveau de tension observé en fonction du type de réaction musculaire, voyons ce que donne l'analyse de la réaction musculaire en fonction du niveau de tension. Le tableau 5 et la figure 4 présentent les mêmes résultats que ceux vus précédemment mais organisés différemment. La validation statistique n'a pas été faite dans ce cas-ci puisqu'il s'agit des mêmes données qu'au tableau 4.

Tableau 5 Type de réaction musculaire en fonction du niveau de tension

Groupe voltage	Type (proj-tét-inconnu)	Total
INCONNU	Aucune	3
	Inconnu	8
	Projection	0
	Tétanisation	1
Total INCONNU		12
Moins de 1 000 volts	Aucune	14
	Inconnu	49
	Projection	2
	Tétanisation	36
		101
Entre 1000 et 10000 volts	Aucune	6
	Inconnu	32
	Projection	4
	Tétanisation	16
Total entre 1000 et 10000 volts		58
Plus de 10 000 volts	Aucune	17
	Inconnu	48
	Projection	10
	Tétanisation	14
Total plus de 10000 volts		89
Total général		260

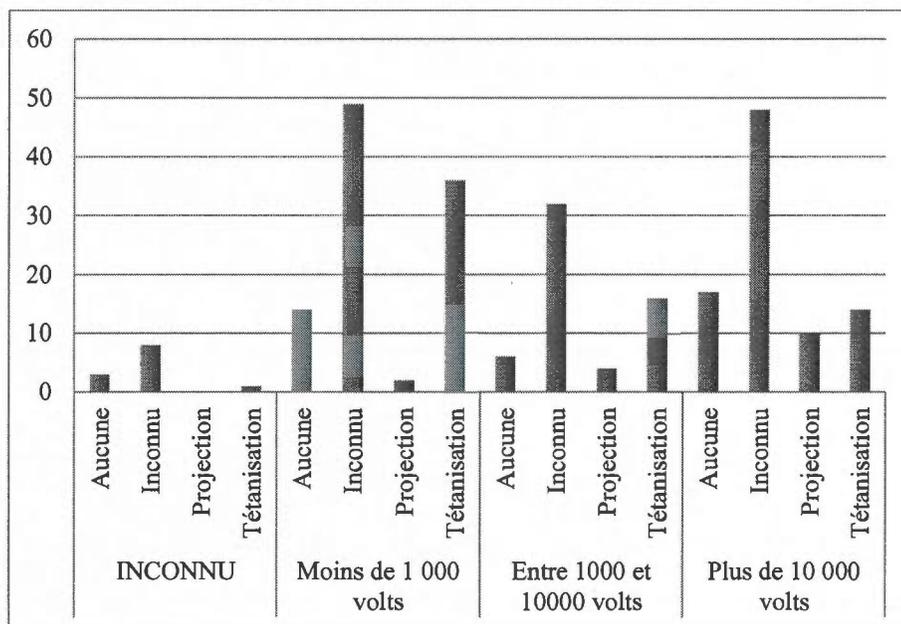


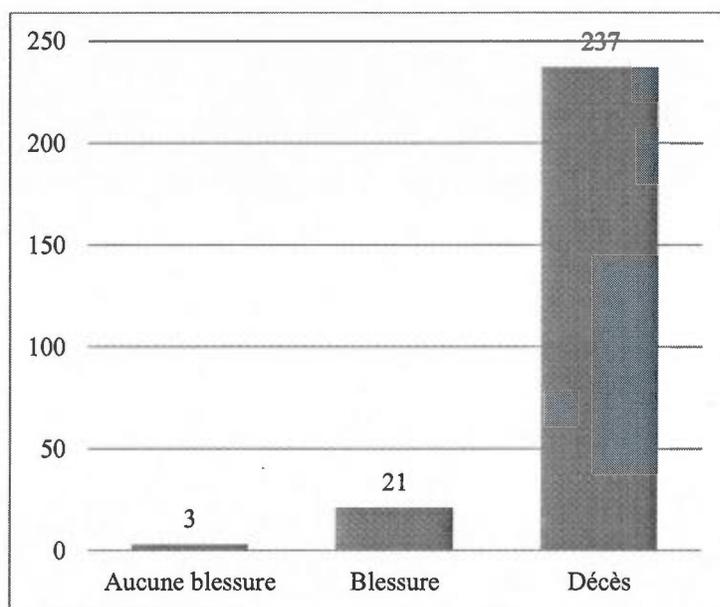
Figure 4 Type de réaction musculaire observée en fonction du niveau de tension

4.2 Conséquences lors des chocs électriques

Qui dit accident dit conséquences (blessure, décès). Or, quelles sont les conséquences des chocs électriques telles que décrites dans les rapports d'accidents utilisés pour la recherche? Les données recueillies ont été classées en trois catégories : Aucune blessure, blessure et décès. Peu importe le type de blessure, la gravité ou la cause de celle-ci, du moment que le travailleur a été blessé, le cas a été rapporté dans la catégorie *Blessure*. Le tableau 6 et la figure 5 présentent ces résultats. Le test du khi2 ($\chi^2=131$ pour 2 dl) montre que les résultats ne sont pas liés à une répartition aléatoire des données ($p<0,01$).

Tableau 6 Conséquences du choc électrique

Résultat (blessure/décès)	Total
Aucune blessure	3
Blessure	21
Décès	237
Total général	259

**Figure 5** Conséquence d'un choc électrique

L'objectif de la recherche étant de comprendre les facteurs qui contribuent à un type de réaction musculaire, il est également utile de voir, à l'inverse, quelles sont les conséquences d'un type de réaction spécifique. Le tableau 7 et la figure 6 présentent cette information. La valeur du χ^2 ($\chi^2=24,6$ pour 4 dl) montre clairement un lien entre le type de réaction musculaire et la conséquence avec $p<0,001$.

Tableau 7 Conséquence de l'accident en fonction du type de réaction musculaire

Type (proj-tét-inconnu)	Résultat (blessure/décès)	Total
Aucune ou inconnue	Aucune blessure	1
	Blessure	14
	Décès	165
Total Aucune		180
Projection	Aucune blessure	2
	Blessure	3
	Décès	10
Total Projection		15
Tétanisation	Aucune blessure	0
	Blessure	4
	Décès	61
Total Tétanisation		65
Total général		260

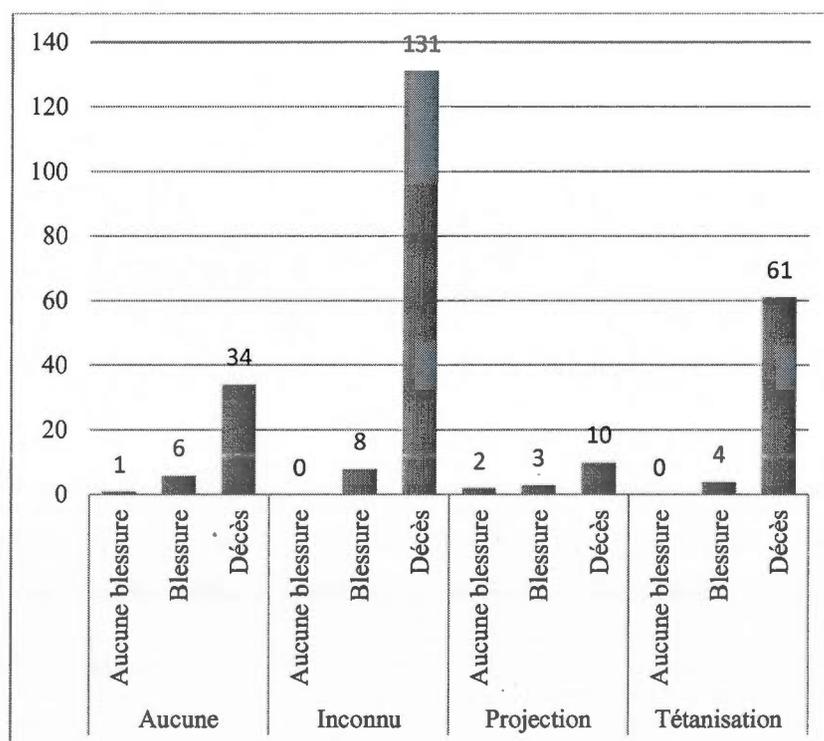


Figure 6 Conséquence de l'accident en fonction du type de réaction musculaire

Si le type de réaction musculaire observée lors de l'accident a un impact sur les conséquences de cet accident, on peut supposer que le niveau de tension subi par le travailleur aura lui aussi un impact sur ces conséquences. Mais est-ce bien le cas? Et si oui, dans quelle mesure? Le tableau 8 et la figure 7 présentent les résultats de la conséquence de l'accident en fonction du niveau de tension. La valeur du khi² ($\chi^2=7,19$ pour 6 dl) montre un lien entre le type de réaction musculaire et la conséquence avec une probabilité que ces résultats soient dus à une répartition aléatoire d'environ 30% ($p \sim 0,30$). Ces résultats ne permettent donc pas d'en tirer de conclusion puisque la relation n'est pas statistiquement significative.

Tableau 8 Conséquence de l'accident en fonction du niveau de tension

Voltage	Résultat (blessure/décès)	Total
INCONNU	Aucune blessure	0
	Blessure	1
	Décès	11
Total Inconnu		12
Moins de 1 000 volts	Aucune blessure	2
	Blessure	6
	Décès	92
Total - de 1000 volts		100
Entre 1000 et 10000 volts	Aucune blessure	0
	Blessure	2
	Décès	57
Total 1kv à 10kv		59
Plus de 10 000 volts	Aucune blessure	1
	Blessure	12
	Décès	77
Total plus de 10kv		
Total général		

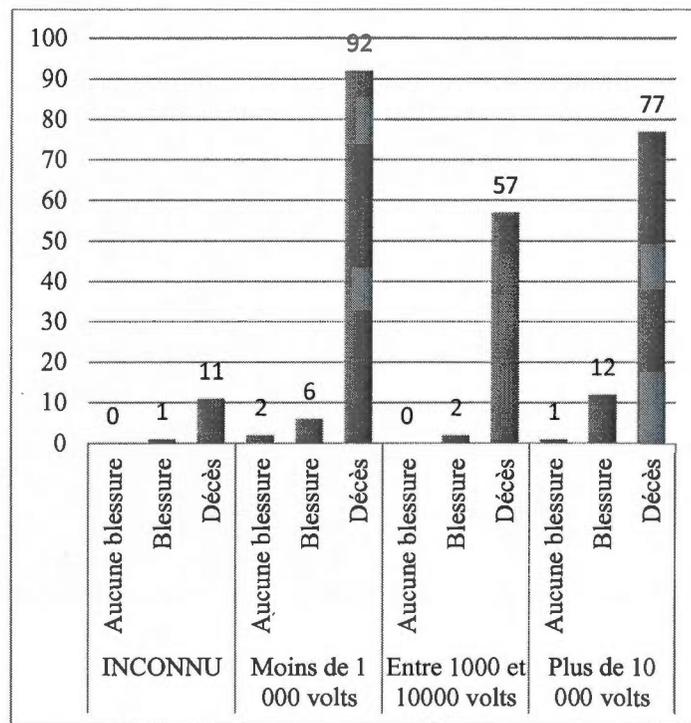


Figure 7 Conséquence de l'accident en fonction du niveau de tension

4.3 Causes de la blessure ou du décès

Les résultats montrant les conséquences (décès ou blessures) liées au choc électrique ont été présentés un peu plus tôt. Cependant, les causes entraînant ces conséquences peuvent varier. Par exemple, une blessure peut être due bien sûr au choc électrique lui-même (électrisation ou électrocution), mais elle peut également être causée par des effets secondaires du choc (le plus fréquemment une chute). Très souvent, le rapport d'autopsie (dans les cas de décès) indique la cause du décès du travailleur. Cette information se retrouve notamment dans les rapports provenant de NIOSH. Dans d'autres cas, il est possible de déduire la cause grâce à la description des événements. La figure 8 montre la répartition des causes de la blessure ou du décès du travailleur. Le tableau 9 montre la répartition de ces mêmes causes en

fonction des situations où il y a eu soit décès, soit blessures. Enfin, la figure 9 et le tableau 10 montrent ces mêmes causes selon le type de réaction musculaire observée. La valeur du χ^2 ($\chi^2=863$ pour 4 dl) montre que cette répartition des données n'a rien d'aléatoire ($p<0,001$).

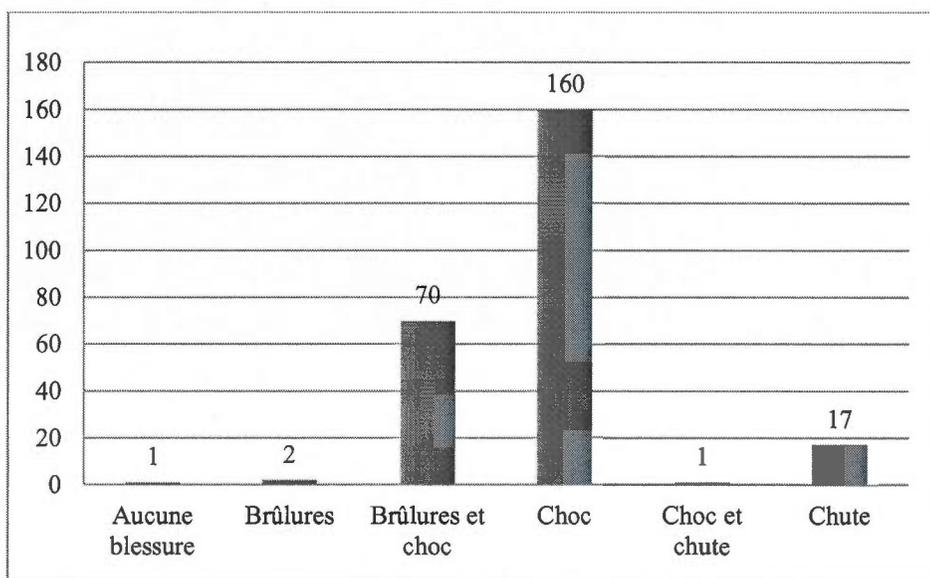


Figure 8 Cause de la blessure ou du décès du travailleur

Tableau 9 Causes du décès ou des blessures subies par le travailleur

Résultat (blessure/décès)	Cause	Total
Blessure	Brûlures	2
	Brûlures et choc	2
	Choc	8
	Choc et chute	1
	Chute	4
Total Blessure		17
Décès	Brûlures	0
	Brûlures et choc	66
	Choc	150
	Choc et chute	0
	Chute	13
Total Décès		229
Total général		246

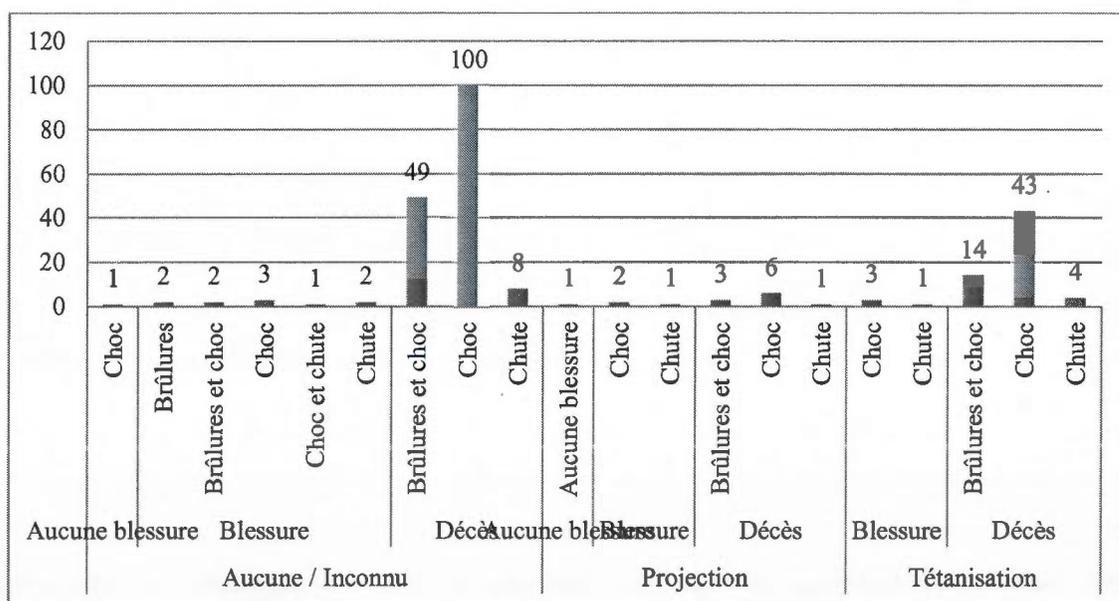
**Figure 9** Causes de la conséquence (blessure ou décès) en fonction du type de réaction musculaire observée

Tableau 10 Causes de la conséquence (blessure ou décès) en fonction du type de réaction musculaire observée

Type (proj-tét-inconnu)	Résultat (blessure/décès)	Cause	Total
Aucune / Inconnu	Aucune blessure	Choc	1
	Total Aucune blessure		1
	Blessure	Brûlures	2
		Brûlures et choc	2
		Choc	3
		Choc et chute	1
		Chute	2
	Total Blessure		10
	Décès	Brûlures et choc	49
		Choc	100
		Chute	8
	Total Décès		157
Total Aucune / Inconnu			168
Projection	Aucune blessure	Aucune blessure	1
	Total Aucune blessure		1
	Blessure	Choc	2
		Chute	1
	Total Blessure		3
	Décès	Brûlures et choc	3
		Choc	6
		Chute	1
	Total Décès		10
Total Projection			14
Tétanisation	Blessure	Choc	3
		Chute	1
	Total Blessure		4
	Décès	Brûlures et choc	14
		Choc	43
		Chute	4
	Total Décès		61
Total Tétanisation			65
Total général			247

4.4 Points d'entrée et de sortie du courant

Selon la position du travailleur par rapport aux éléments sous tension, les points d'entrée et de sortie du courant vont varier. Le tableau 11 présente les points d'entrée et de sortie du courant en fonction du type de réaction musculaire subie. Les résultats de ce tableau étant difficiles à interpréter, ils ont été résumés dans le tableau 12 sans tenir compte du type de réaction musculaire puis dans le tableau 12 avec réaction musculaire. Les résultats des tableaux 12 et 13 regroupent les points d'entrée et de sortie en fonction de la région du corps touchée soit le haut (bras, mains), le bas (pieds, jambes) et les autres parties du corps (tête, tronc et dos). Plusieurs cas ne permettent pas de déterminer le point d'entrée et de sortie; Ces cas ont été répertoriés dans « Inconnu ». La figure 10 illustre quant à elle les résultats du tableau 13 mais en considérant uniquement les cas de projection et de tétanisation. Avec 8 degrés de liberté et une valeur de $\chi^2=11,11$ (pour les résultats de la figure 10), les résultats ne peuvent être considérés comme statistiquement significatifs ($p>0,05$).

Tableau 11 Points d'entrée et de sortie du courant en fonction du type de réaction musculaire

Type (proj-tét-inconnu)	Entrée-sortie combinées	Total
Aucune / Inconnu	bras-bras	5
	bras-inconnu	1
	bras-jambe	2
	bras-main	1
	bras-pied	1
	bras-tronc	1
	dos-pied	1
	Inconnu	85
	jambe-tronc	1
	main-bras	2
	Main-Inconnu	11
	Main-jambe	5
	main-main	18
	main-pied	26
	main-tronc	4
	tête-bras	1
	tête-inconnu	2
	tête-main	3
	tête-pied	1
	tête-tronc	3
	tronc-bras	2
	tronc-inconnu	1
	Total Aucune / Inconnu	
Projection	bras-inconnu	1
	bras-pied	1
	Inconnu	3
	Main-Inconnu	1
	Main-jambe	1
	main-main	1
	main-pied	6
tête-inconnu	1	
Total Projection		15
Tétanisation	bras-jambe	1
	bras-main	1
	bras-pied	1
	Inconnu	3
	main-bras	2
	main-cuisse	1
	Main-Inconnu	15
	main-main	16
	main-pied	24
tête-pied	1	
tronc-bras	1	
Total Tétanisation		66
Tétanisation suivie d'une projection	main-main	1
Total Tétanisation suivie d'une projection		1

Tableau 12 Régions du corps impliquées lors du choc électrique (points d'entrée et de sortie)

Entrée-sortie combinées	Total
Haut-haut	48
Haut-inconnu	29
Haut-bas	67
Haut-autre	12
Bas-bas	0
Autre-bas	4
Autre-inconnu	4
Inconnu-Inconnu	91
Autre-Autre	3
Total	258

Tableau 13 Régions du corps impliquées en fonction du type de réaction musculaire

Type (proj-tét-inconnu)	Entrée-sortie combinées	Total
Inconnu	Haut-haut	26
	Haut-inconnu	12
	Haut-bas	34
	Haut-autre	11
	Bas-bas	0
	Autre-bas	3
	Autre-inconnu	3
	Inconnu-Inconnu	85
	Autre-Autre	3
	Total Inconnu	
Projection	Haut-haut	2
	Haut-inconnu	2
	Haut-bas	6
	Haut-autre	0
	Bas-bas	0
	Autre-bas	0
	Autre-inconnu	1
	Inconnu-Inconnu	3
	Autre-Autre	0
Total Projection		14
Tétanisation	Haut-haut	20
	Haut-inconnu	15
	Haut-bas	27
	Haut-autre	1
	Bas-bas	0
	Autre-bas	1
	Autre-inconnu	0
	Inconnu-Inconnu	3
	Autre-Autre	0
Total Tétanisation		67
Total général		258

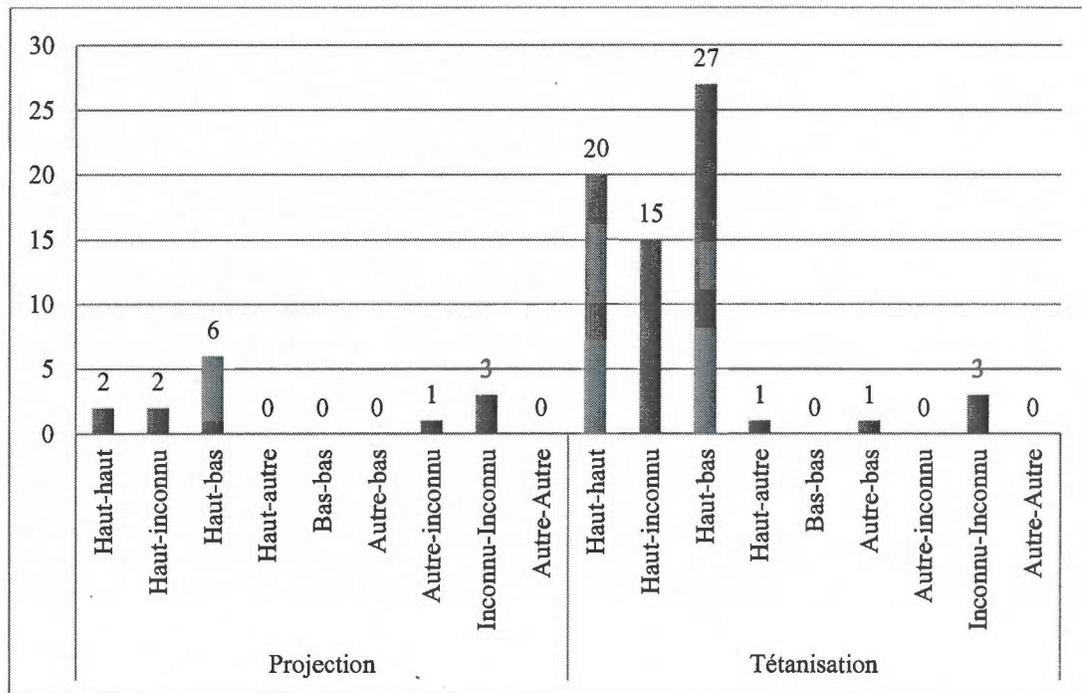


Figure 10 Régions du corps impliquées lors du choc électrique en fonction du type de réaction musculaire

4.5 Source des rapports d'accidents

Au chapitre 3 portant sur la méthodologie, il a été mentionné que différentes sources seraient utilisées pour cette recherche. La figure 1 a déjà présenté la répartition du nombre de cas recueillis pour chacune des sources.

Il est possible que la source du rapport ait influencé les résultats obtenus. Il n'est pas ici question d'insinuer que les résultats puissent être biaisés de par la manière dont ils sont interprétés, et encore moins que la source ait une influence sur l'accident lui-même; Il s'agit plutôt du fait que, de par leur mandat ou la nature des rapports d'accidents recueillis, les rapports provenant de certains organismes peuvent

possiblement favoriser d'avantage un type de réaction ou d'événement plutôt qu'un autre. Par exemple, par définition, le programme FACE (*Fatal Accident Circumstances and Epidemiology*) de NIOSH ne regroupe que des accidents ayant entraîné le décès de la victime.

Afin de tenter de déterminer si oui ou non la source a une influence sur les résultats, le tableau 14 et la figure 11 présentent les résultats pour chaque source de rapport utilisée.

La valeur du khi² ($\chi^2=8,51$ pour 6 dl) montre un lien entre le type de réaction musculaire et la provenance du rapport avec une probabilité de 20% que le type de réaction soit indépendant de la source du rapport.

Tableau 14 Type de réaction musculaire observée en fonction de la source du rapport

Source	Type (proj-tét-inconnu)	Total
ABB	Aucune	4
	Inconnu	7
	Projection	3
	Tétanisation	3
Total ABB		17
Autre	Aucune	0
	Inconnu	3
	Projection	0
	Tétanisation	1
Total Autre		4
CSST	Aucune	20
	Inconnu	56
	Projection	7
	Tétanisation	31
Total CSST		114
NIOSH	Aucune	16
	Inconnu	71
	Projection	6
	Tétanisation	32
Total NIOSH		125
Total général		260

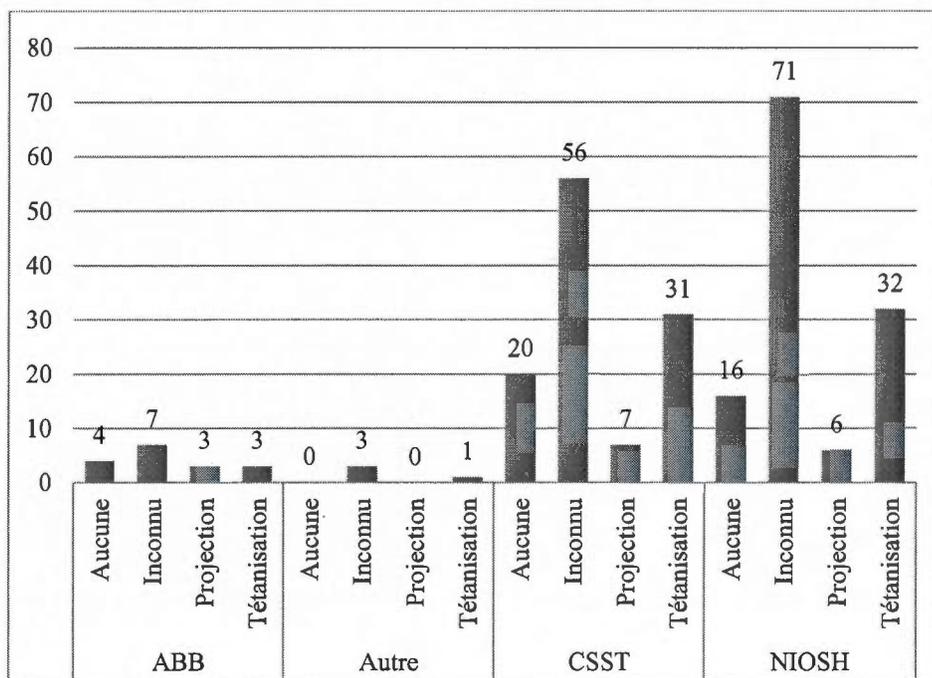


Figure 11 Type de réaction musculaire observée en fonction de la provenance du rapport

Et si la source des rapports a un impact sur les résultats pour la répartition du type de réaction musculaire observée, qu'en est-il pour ce qui est des conséquences de l'accident? C'est ce que montrent le tableau 15 et la figure 12. La valeur du χ^2 ($\chi^2=53$ pour 6 dl) montre que cette répartition des données n'a rien d'aléatoire.

Tableau 15 Conséquence de l'accident en fonction de la source du rapport

Source	Résultat (blessure/décès)	Total
ABB	Aucune blessure	2
	Blessure	7
	Décès	8
Total ABB		17
Autre	Aucune blessure	0
	Blessure	0
	Décès	3
Total Autre		3
CSST	Aucune blessure	1
	Blessure	12
	Décès	101
Total CSST		114
NIOSH	Aucune blessure	0
	Blessure	2
	Décès	125
Total NIOSH		127
Total général		261

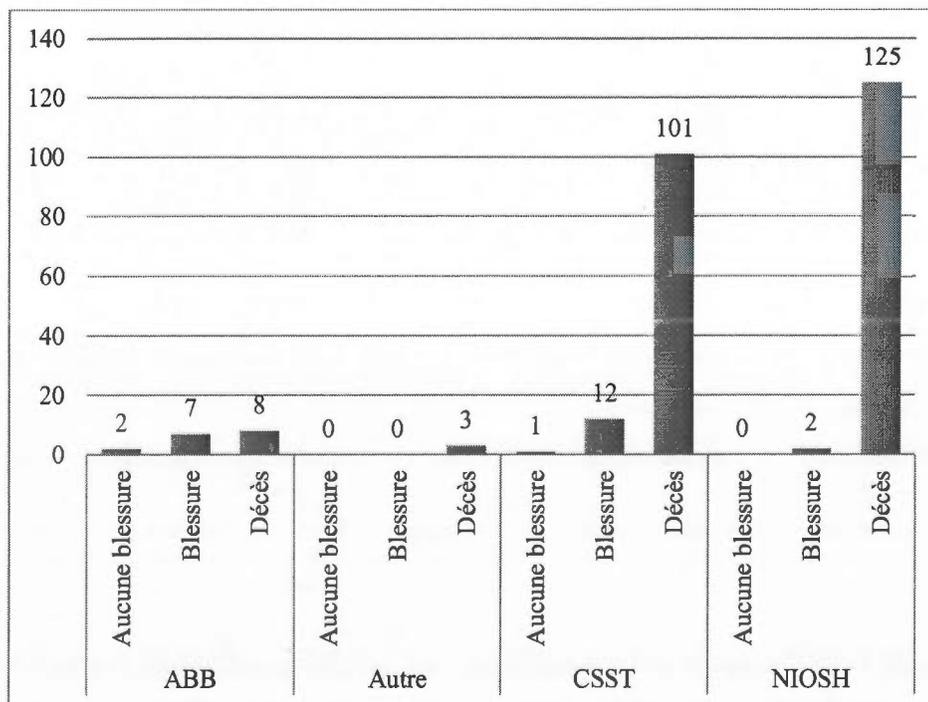


Figure 12 Conséquence de l'accident en fonction de la source du rapport

4.6 Catégories d'emplois

Bien que cela n'ait pas d'influence sur le type de réaction musculaire, le type d'emploi occupé par le travailleur au moment de l'accident peut être intéressant afin de déterminer si les titulaires de certaines catégories d'emplois sont plus susceptibles que d'autres de subir des accidents de nature électrique. La figure 13 représente la répartition du type d'emploi occupé par la victime. Le test du χ^2 pour cette répartition donne un $p < 0,05$.

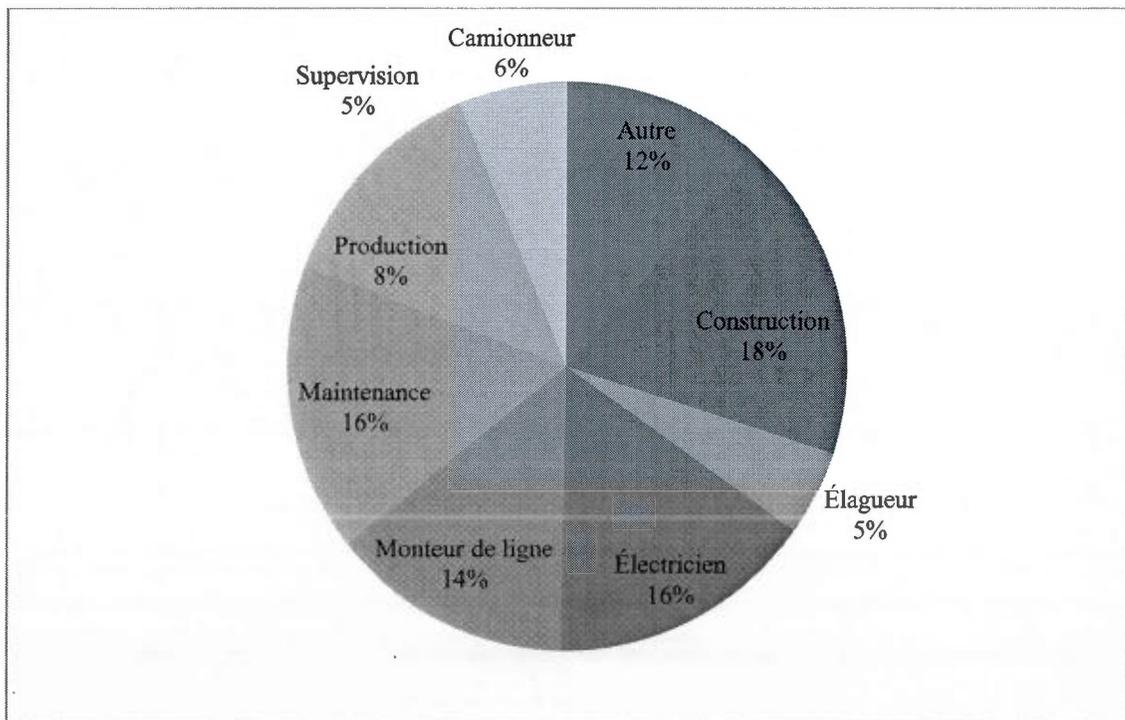


Figure 13 Type d'emploi occupé par la victime

4.7 Autres résultats

Les résultats présentés jusqu'ici couvrent l'ensemble des informations qui m'ont parues utiles pour la suite de la discussion. Plusieurs autres données ont toutefois été comptabilisées durant l'analyse sans pour autant qu'il soit possible de les regrouper sous forme de graphiques ou de tableaux comme cela a été fait jusqu'ici. Certaines de ces informations n'en demeurent pas moins intéressantes; C'est le cas notamment de l'âge et/ou de l'expérience du travailleur, du sexe de celui-ci, ou bien de l'activité en cours au moment de l'accident. Certaines de ces données seront discutées dans les chapitres suivants.

Chapitre 5

Interprétation des résultats

L'objet du mémoire est de déterminer si certains facteurs peuvent favoriser le type de réaction musculaire (projection ou tétanisation) subie par un travailleur lors d'un choc électrique ainsi que les conséquences que ce type de réaction entraîne. Le chapitre 4 a présenté les résultats obtenus lors de l'analyse des rapports d'accidents. Le chapitre 5 sera l'occasion de revenir sur ces résultats et de les analyser plus en détails.

5.1 Retour sur les résultats

Au total, 256 rapports d'accident ont été retenus et analysés. Cependant dans les tableaux présentés, le nombre total de cas est généralement plus élevés que ce nombre. La raison est que pour certains rapports, l'accident rapporté comportait plus d'une victime et que les conséquences sur ces personnes pouvaient parfois être différentes. Un des incidents étudié rapporte une situation où le travailleur a d'abord subi une tétanisation suivie d'une projection. Lorsque cela était nécessaire, ce cas a été rapporté à la fois dans la catégorie tétanisation et dans la catégorie projection. Tous ces facteurs mis ensemble expliquent pourquoi le nombre total de cas présentés dans les différents tableaux et graphiques peut varier.

Avant de débiter l'interprétation des résultats, il est important de mentionner que la classification du type de réaction musculaire a parfois été faite en se basant sur l'interprétation des données fournies dans le rapport. Si certains rapports étaient

clairs sur le type de réaction observée, la plupart n'y faisaient aucune allusion. Dans plusieurs cas, aucun témoin oculaire n'ayant pu décrire précisément l'incident, il était impossible de déterminer une réaction musculaire chez la victime. Même dans les cas où un témoin était présent, la réaction musculaire n'est généralement pas décrite. En effet, les rapports gouvernementaux ont pour but de décrire les événements un peu à la manière d'un rapport de police, c'est-à-dire que l'inspecteur présent cherche à reconstituer l'événement en se basant sur des faits précis. Le rapport émis servira par la suite aux instances gouvernementales à décider si des actions doivent être prises, comme par exemple si des amendes seront imposées à l'entreprise fautive. Dans un tel contexte, la réaction musculaire du travailleur lors du choc électrique a peu d'impact sur la finalité du rapport, ce qui explique sans doute qu'on trouve rarement ce genre de précision.

Dans le cas des rapports provenant d'entreprises, l'objectif du rapport est de partager avec les autres unités d'affaires les circonstances de l'accident afin d'en tirer des leçons et d'éviter que la situation ne se reproduise. Encore ici, le type de réaction musculaire a peu d'impact et cette information n'est pas toujours disponible. Toutefois, ma présence à l'intérieur de l'entreprise m'a permis dans certains cas d'obtenir cette information pour ma compagnie (lorsqu'elle était disponible) afin d'avoir des données plus précises.

5.2 Type de réaction musculaire

La figure 2 a présenté la répartition du type de réaction musculaire observée. Il apparaît clairement que les cas les plus fréquents sont ceux où le type de réaction musculaire est inconnu (137 cas sur 259). Comme cela a été mentionné dans la section précédente, ces résultats s'expliquent en bonne partie lorsqu'on considère que plusieurs événements sont survenus sans témoin direct. S'il y a eu réaction

musculaire, personne n'a donc pu en attester. Il peut aussi s'agir de cas où l'inspecteur n'a pas jugé bon d'inclure cette information, jugeant que celle-ci n'était pas pertinente dans le contexte du rapport d'accident.

La deuxième situation la plus fréquemment observée, concernant le type de réaction musculaire, est la situation où il n'y a aucune réaction musculaire. Cette situation est toutefois très proche de la situation précédente, où la réaction était inconnue. Dans la majorité des rapports, la réaction musculaire, si elle a eu lieu, n'est pas explicitement décrite. Il est dès lors difficile de définir si nous sommes en présence d'une situation où il n'y a réellement pas eu de réaction musculaire ou tout simplement si celle-ci est inconnue. Pour cette raison dans bien des cas, les résultats définis comme *Réaction Inconnue* et *Aucune réaction* ont été interprétés comme étant une seule et même catégorie. Dès lors, la catégorie *Aucune réaction / Réaction inconnue* compte 177 cas sur 259, soit les deux tiers du total des cas analysés.

Pour les cas où une réaction musculaire a été identifiée, le tableau 2 montre une nette prédominance des cas de tétanisation (67 cas) par rapport aux cas de projection (16 cas). D'un point de vue purement anatomique, ces résultats ne représentent pas une surprise en soi; Le contact avec un conducteur sous tension fait en sorte que n'importe quels muscles peuvent être stimulés. Il peut donc s'agir de fléchisseurs, d'extenseurs, ou les deux à la fois. Dans le cas où seul un groupe de muscles sera stimulé, la réaction qui en résultera sera directement reliée au mouvement généré par le groupe de muscles en question (flexion et possiblement tétanisation pour les fléchisseurs, projection pour les extenseurs). Toutefois si les deux groupes de muscles sont stimulés simultanément, la plus grande capacité musculaire des muscles fléchisseurs fera en sorte que c'est le mouvement généré par ces derniers (la flexion et ultimement, la tétanisation) qui sera prédominant (Fish et al., 2009b). Dès lors, il apparaît normal que la proportion de cas où une réaction de tétanisation a été identifiée soit supérieure à celle des cas de projection.

5.3 Type de réaction musculaire et niveau de tension

Le premier facteur qui nous vient à l'esprit lorsqu'on veut déterminer ce qui peut influencer le type de réaction musculaire lors d'un choc électrique est le niveau de tension subit. C'est donc ce facteur qui sera analysé en premier pour voir s'il influence ou non la réaction musculaire.

Dans le cas où le niveau de tension n'aurait pas d'influence sur le type de réaction musculaire observée, on devrait s'attendre à ce que peu importe le type de réaction musculaire, on retrouve approximativement les mêmes proportions des niveaux de tension pour chacune des situations. Or les résultats présentés au tableau 4 montrent qu'environ les deux tiers des cas de projection (10 sur 16) sont survenus à une tension supérieure à 10 000 volts soit approximativement le double de la proportion observée sur l'ensemble des cas. À l'inverse, seulement 2 cas sur 16 sont survenus à une tension inférieure à 1 000 volts. Le test du khi carré effectué sur ces valeurs donne $p=0,061$ ($p>0,05$). La différence observée ne peut donc être considérée comme statistiquement significative. Bien qu'en apparence les différences paraissent importantes, le faible nombre de cas observés pour la projection a pour conséquence que les résultats ne peuvent être considérés comme significatifs. Une analyse plus poussée (englobant d'avantage de cas de projection) serait donc nécessaire pour pouvoir en tirer une réelle conclusion.

Est-ce que le même genre de situation s'observe pour la téτανisation? Toujours au tableau 4, on peut voir qu'un peu plus de la moitié des cas (36 cas sur 67) sont survenus à moins de 1 000 volts. Pour ce qui est des voltages plus élevés, on retrouve respectivement 16 cas observés entre 1 000 et 10 000 volts et 14 cas à plus de 10 000 volts. Il existe donc un écart important par rapport aux valeurs attendues

quoique moins spectaculaire que pour les cas de projection. Le test du khi carré effectué sur ces valeurs donne un résultat de $\chi^2=8,79$ pour 3 dl, ce qui correspond à $p=0,032$ ($p<0,05$). Contrairement à la projection, la différence observée pour la téτανisation peut donc être considérée comme statistiquement significative.

L'analyse des informations relatives à l'influence du niveau de tension sur le type de réaction musculaire s'est faite jusqu'ici en comparant les données pour un type de réaction spécifique par rapport aux valeurs attendues. Mais qu'en est-il lorsqu'on reprend les résultats du tableau 4 pour comparer directement l'importance de la différence entre les résultats pour la projection et la téτανisation? Dans un tel cas, le test du khi carré nous donne un $p=0,032$ ($p<0,05$), ce qui démontre que le niveau de tension a bel et bien un impact sur le type de réaction musculaire observée. Autrement dit, lorsqu'on compare directement les résultats des cas de projection ou de téτανisation les uns avec les autres, les résultats montrent que le niveau de tension influence le type de réaction musculaire.

La figure 4 reprend les mêmes données mais cette fois en regardant, pour chaque niveau de tension, la répartition du type de réaction musculaire. Cette analyse met en relief une autre constatation : On y voit en effet que pour des cas où la tension est inférieure à 1 000 volts, la réaction observée (lorsqu'il y a réaction) est presque exclusivement une téτανisation. Dans cette situation, on observe seulement 2 cas de projection sur 38 situations où une réaction musculaire a été observée. À l'inverse, lorsqu'une situation musculaire est observée sous une tension inférieure à 1 000 volts, il s'agit dans 36 cas sur 38 d'une téτανisation (le test du χ^2 fournit un $p=0,01$).

Toujours à partir des données de la figure 4, on voit que cette tendance se modifie lorsque le voltage augmente. Lorsque la tension se situe entre 1 000 et 10 000 volts, la proportion de cas où on observe une téτανisation baisse avec 4 cas de

projection pour 16 cas de tétanisation (le test du χ^2 fournit un $p=0,77$). À ce niveau de tension, les résultats se rapprochent de la proportion attendue si bien que l'écart ne peut être considéré comme significatif. Cette proportion diminue encore d'avantage lorsqu'on est en présence d'une tension supérieure à 10 000 volts; On retrouve alors 10 cas de tétanisation, contre 14 cas de projection. Les données s'éloignent alors des valeurs attendues et le test du χ^2 fournit un $p=0,027$, ce qui rend ces résultats statistiquement significatifs.

À la lumière de ces résultats, il semble donc que le niveau de tension subi par le travailleur au moment de l'accident ait une influence sur le type de réaction musculaire. On peut en effet présumer que dans une situation où le travailleur entre en contact avec une tension de moins de 1 000 volts, si une réaction musculaire se produit, il s'agira presque assurément d'une tétanisation. Plus la tension augmente, plus les chances que le travailleur subisse une projection augmentent. Lorsque la tension atteint des niveaux élevés (supérieure à 10 000 volts), le travailleur a approximativement autant de chances de subir une tétanisation qu'une projection.

Si la probabilité de subir un type de réaction spécifique plutôt qu'une autre est influencée par le niveau de tension, qu'en est-il de ce qui touche à la probabilité que la victime subisse une réaction musculaire quelle qu'elle soit? La proportion de situations où il n'y a eu aucune réaction musculaire ou bien où celle-ci était inconnue est de 62% à moins de 1 000 volts, 83% entre 1 000 et 10 000 volts, et 73% à plus de 10 000 volts. Il n'y a donc pas apparence d'une tendance claire en ce qui touche les probabilités de subir une réaction musculaire lors du choc. Aucun de ces résultats n'est statistiquement significatif ($p>0,05$).

5.4 Conséquences de l'accident

Les tableaux 6, 7 et 8 ainsi que les figures 5, 6 et 7 ont présenté les résultats relatifs aux conséquences de l'accident. À la figure 5, il apparaît que dans l'immense majorité des cas, le travailleur est décédé des suites de l'accident. Ce résultat, qui semble à première vue spectaculaire, doit être mis en perspective par le fait que, tel que décrit au chapitre 3, les cas répertoriés ne constituent pas l'ensemble des cas d'accidents de nature électrique mais sont plutôt un échantillonnage des cas aux conséquences les plus sérieuses. Par exemple, les données compilées montrent que sur les 259 cas analysés, 92% ont résulté en un décès du travailleur. Est-ce à dire que 92% des gens subissant un choc électrique décèdent? Certainement pas. La plupart d'entre nous avons déjà subi un choc électrique léger en effectuant des travaux à la maison sans en subir de conséquences sérieuses. Encore une fois, c'est la fin propre à chacun des rapports produits par les sources étudiées qui entraîne cette distorsion.

Laissons de côté les cas où il n'y a eu aucune réaction musculaire ou bien où celle-ci est inconnue pour nous concentrer sur celles où il y a eu projection ou tétanisation. Les résultats de la figure 6 montrent que lorsqu'on est en présence d'une réaction musculaire définie, il semble y avoir une proportion bien différente des conséquences subies par le travailleur. Cette différence est mise en relief par la figure 14 ($p < 0,05$).

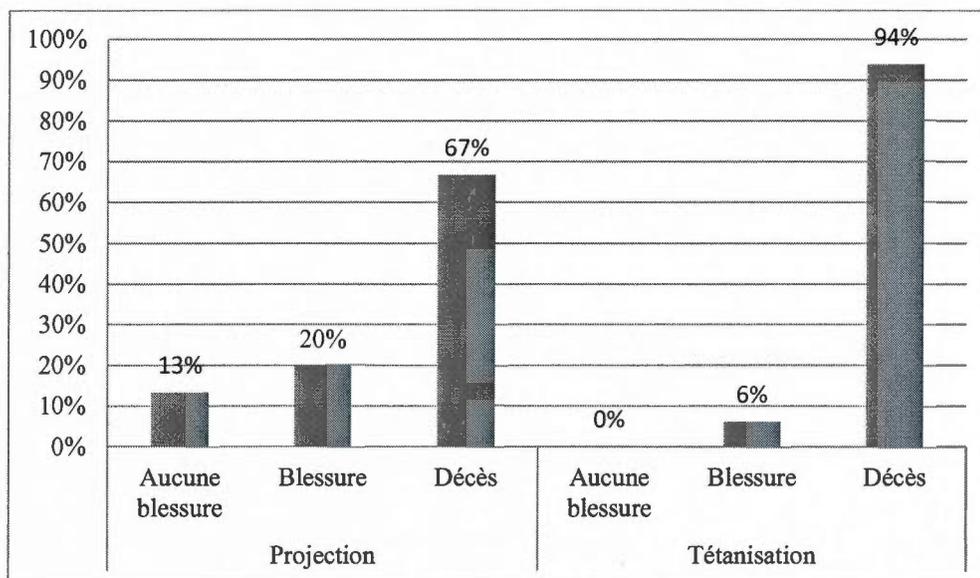


Figure 14 Pourcentage de blessures/décès en fonction du type de réaction musculaire

Selon les données de la figure 14, lorsqu'un travailleur subit un choc électrique provoquant une réaction de téτανisation, ses chances de survivre au choc électrique sont extrêmement faibles. Bien que dans la majorité des cas une réaction de projection entraîne elle aussi le décès du travailleur, il semble que ce type de réaction laisse au travailleur des chances de survie qui soient nettement supérieures (1 chance sur 3 de survivre à une projection VS seulement une chance sur 15 à une téτανisation). Les figures 15 et 16 reprennent ces résultats afin d'illustrer les conséquences spécifiques à un type de réaction musculaire.

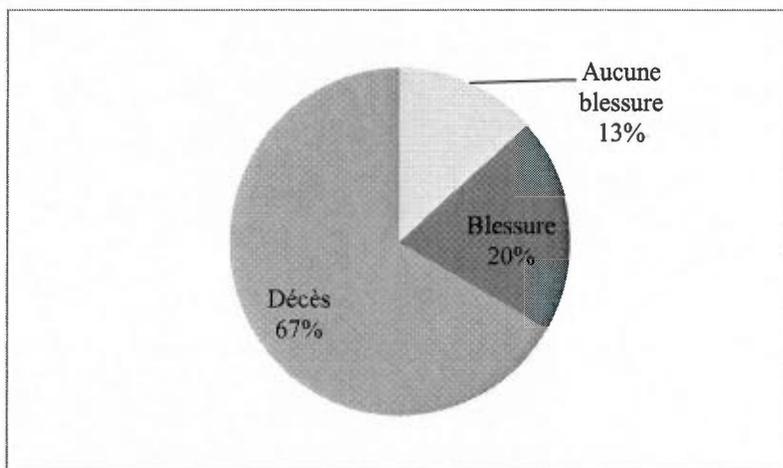


Figure 15 Conséquence de l'accident lorsqu'il y a réaction de projection

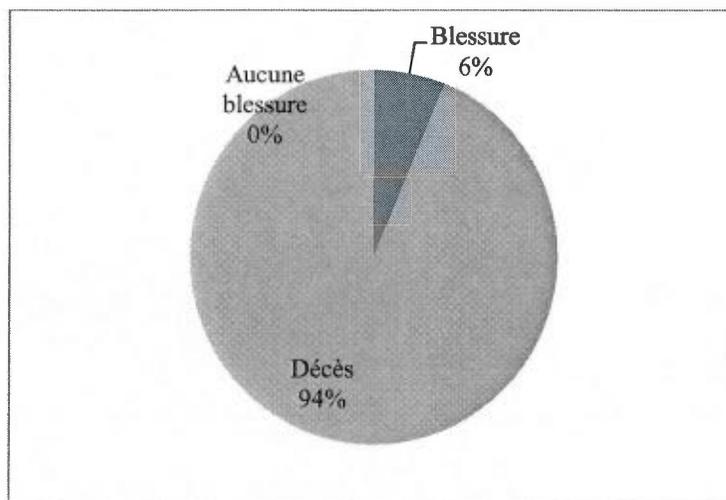


Figure 16 Conséquence de l'accident lorsqu'il y a réaction de téτανisation

Comment expliquer ce phénomène et en quoi le type de réaction musculaire peut-il influencer les conséquences du choc électrique? Pour répondre à cette question, reportons-nous à la section 2.2. Il y avait alors été mentionné que parmi les facteurs pouvant influencer l'impact d'un choc électrique sur le corps humain (IEC/TS 60479-1, 2005), un des premiers était la durée du choc. Or, lorsqu'il y a

tétanisation, le travailleur ne pouvant relâcher l'élément sous tension, il prolonge ainsi la durée du contact. Résultat : La gravité des blessures subies augmente de manière importante. À l'inverse dans une situation de projection, le travailleur étant projeté loin de l'élément sous tension, le contact avec cet élément est coupé immédiatement, limitant ainsi les conséquences du choc et ce, malgré le niveau de tension plus élevé.

Si les conséquences pour la victime varient en fonction du niveau de tension et du type de réaction musculaire, quelle serait la pire combinaison possible pour un travailleur c'est-à-dire celle pour laquelle les probabilités de décès sont les plus élevées. La figure 17 présente le lien entre les conséquences, le niveau de tension et le type de réaction musculaire ($\chi^2=10,62$ pour 4 dl, ce qui donne $p<0,05$).

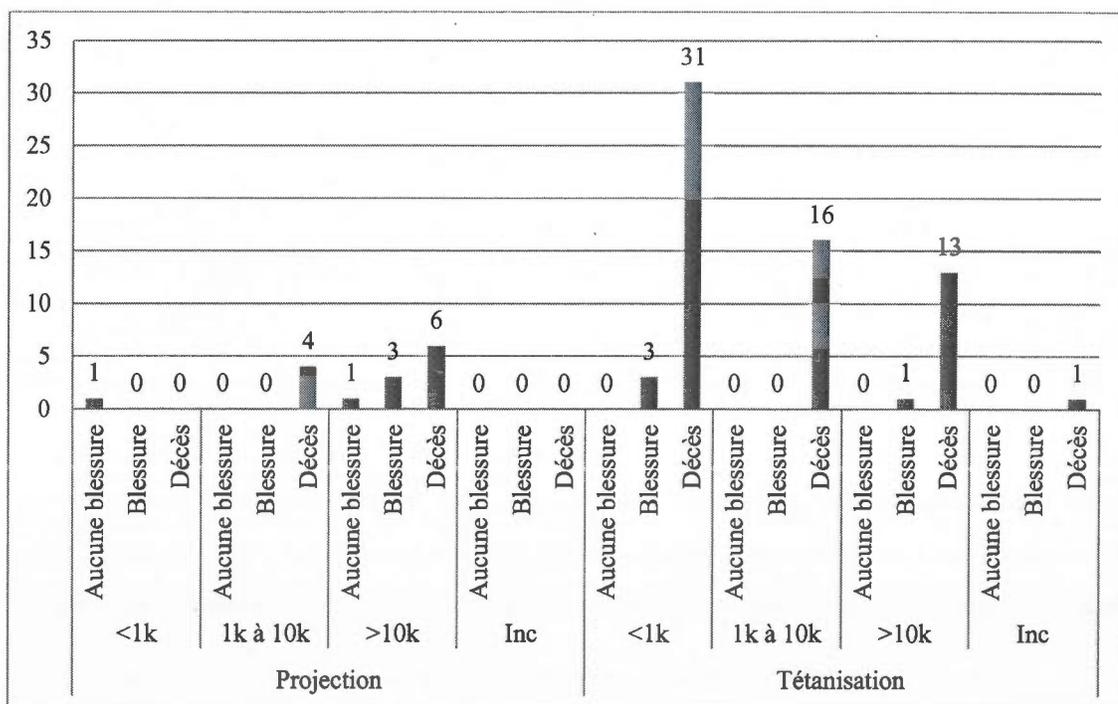


Figure 17 Conséquence en fonction du niveau de tension et du type de réaction musculaire .

Ces résultats confirment en bonne partie ce qui avait déjà été présenté au sujet des conséquences, dans un premier temps par rapport au niveau de tension et ensuite, en fonction du type de réaction musculaire. Toutefois, la figure 17 présente quelques points intéressants qui n'avaient pas été mentionnés dans les analyses précédentes :

- À un niveau de tension inférieur à 1 000 volts, la probabilité de subir une projection est faible.
- Peu importe le niveau de tension impliqué, les chances de survie du travailleur lorsque survient une tétanisation sont très faibles.
- Le type de réaction musculaire a plus d'impact sur les chances de survie d'un travailleur que le niveau de tension subit (confirmé par les figures 6 et 7).
- Étrangement, les probabilités de survie à un choc de haute tension (>10 000 volts) semblent plus élevées (21%) qu'à une basse tension (<1 000 volts) où elles ne sont que de 14%. Ceci s'explique par le fait qu'à basse tension, le travailleur sera d'avantage susceptible de subir une tétanisation, comme cela a été expliqué précédemment. Toutefois, les résultats obtenus ($p > 0,10$) ne sont pas statistiquement significatifs et il n'est donc pas possible d'utiliser cette affirmation comme une conclusion formelle.
- Le niveau de tension le plus « meurtrier » semble être, et de loin, la tension moyenne (entre 1 000 et 10 000 volts). La figure 16 montre que tous les travailleurs ayant subi un choc à de telles tensions, peu importe le type de réaction musculaire subi sont décédés. En fait, si on se réfère à la figure 6, seulement 2 travailleurs sur les 59 (3%) ayant subi un tel choc ont survécus. Pour chacun de ces deux cas, le type de réaction musculaire était inconnu (ou il n'y avait eu aucune réaction musculaire).

5.5 Cause de la blessure ou du décès

On a bien vu jusqu'ici la conséquence en termes de blessure ou de décès. Mais quelle est réellement la cause de cette blessure ou du décès? Si dans la plupart des cas, la conséquence est liée directement au choc (on parle alors d'électrisation ou d'électrocution), certaines autres situations surviennent où le choc peut être le déclencheur d'une situation, mais la cause réelle des lésions subies n'est pas liée à l'électricité. C'est le cas notamment lorsque le travailleur chute en réaction au choc électrique. Très souvent, le contact avec les éléments sous tension n'entraîne pas une électrisation au sens où on l'entend le plus souvent (un arrêt cardiaque ou respiratoire) mais les brûlures engendrées par ce contact provoquent des blessures ou même le décès du travailleur. Est-ce que certaines situations sont plus susceptibles de favoriser l'une ou l'autre de ces situations?

La figure 18 montre que le choc lui-même est directement la cause de 64% des blessures ou décès liés à un choc électrique. En ajoutant à cela les situations où la cause est un mélange de brûlures et du choc lui-même, on englobe près de 92% des situations. Les chutes quant à elles ne représentent qu'un peu moins de 7% des causes de blessures ou décès.

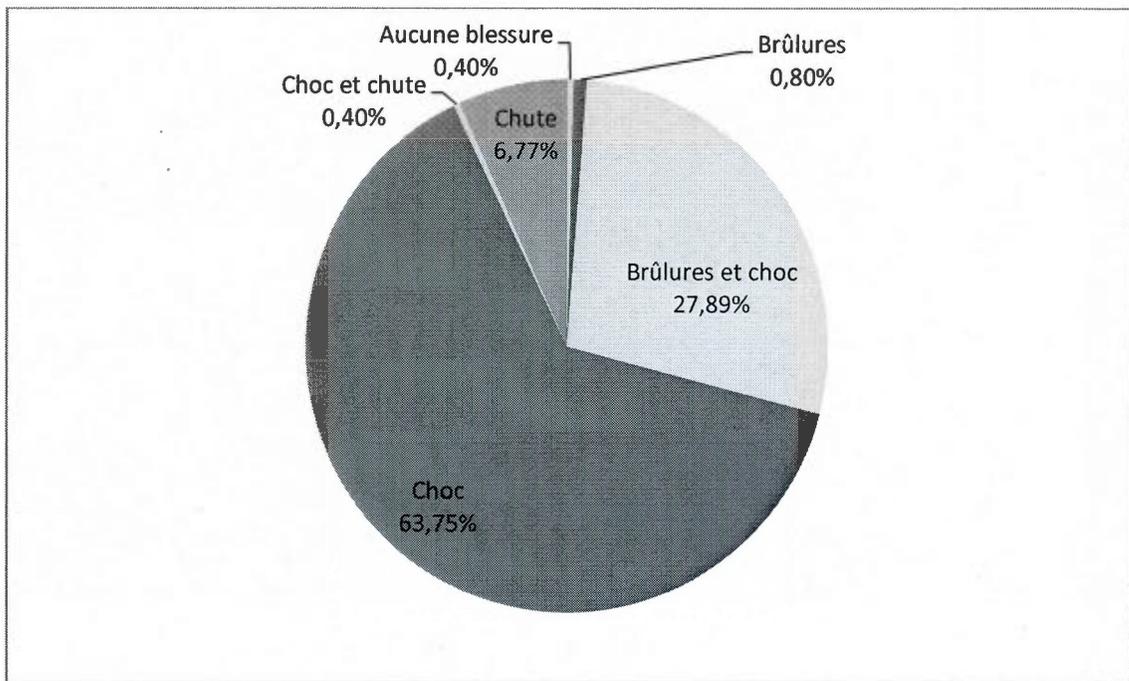


Figure 18 Répartition des causes de la blessure ou du décès

De prime abord et de par la nature du mouvement qu'elle engendre, la projection semble plus susceptible de provoquer la chute que la tétanisation. On serait donc en mesure de s'attendre à ce que la proportion des chutes soit plus élevée lors des situations de projection que pour les autres situations. Or, comme le démontre la figure 19, la majorité des situations (excluant les cas où la réaction est inconnue) où la chute est la cause des blessures ou du décès, la réaction musculaire observée est une tétanisation (5 cas sur 7). Cette situation est difficilement explicable, à moins de supposer qu'elle soit due au nombre de cas de tétanisation rapportés qui est beaucoup plus élevé que ceux de projection. De toute façon, les résultats obtenus ne permettent pas de démontrer un lien statistiquement significatif ($p > 0,05$).

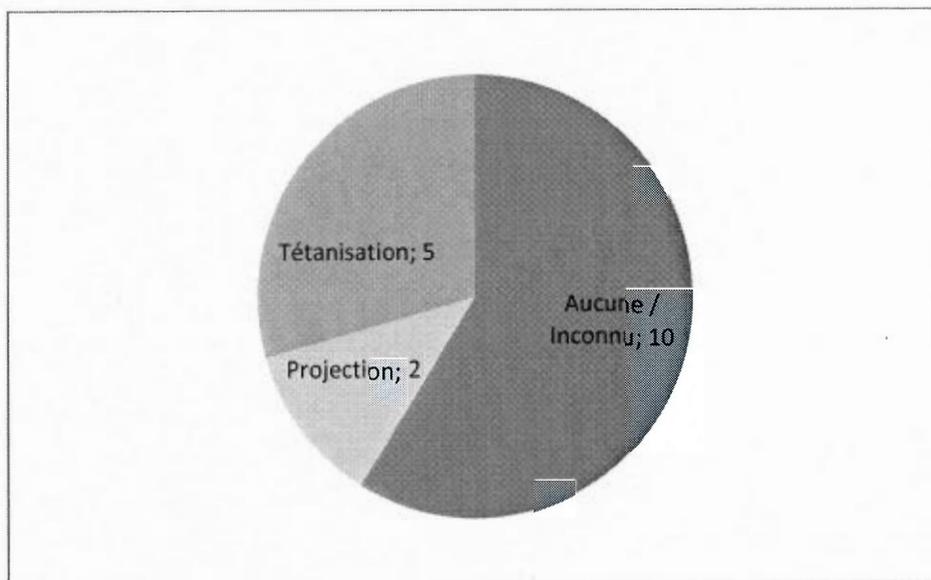


Figure 19 Type de réaction musculaire dans les cas de chute

Le tableau 16 montre comment se répartissent les causes selon que le travailleur a été blessé ou est décédé ($\chi^2=23,1$ pour 2 dl, $p<0,05$). La figure 20 présente cette répartition pour les situations où il y a eu blessure. La figure 21 montre cette même répartition pour les situations où il y a eu décès.

Tableau 16 Répartition de la cause en fonction de la conséquence (blessure ou décès)

Résultat (blessure/décès)	Cause	Total	Proportion
Blessure	Brûlures et choc	12	71%
	Choc et chute	1	6%
	Chute	4	24%
Total Blessure		17	100%
Décès	Brûlures et choc	216	94%
	Choc et chute	0	0%
	Chute	13	6%
Total Décès		229	100%
Total général		246	

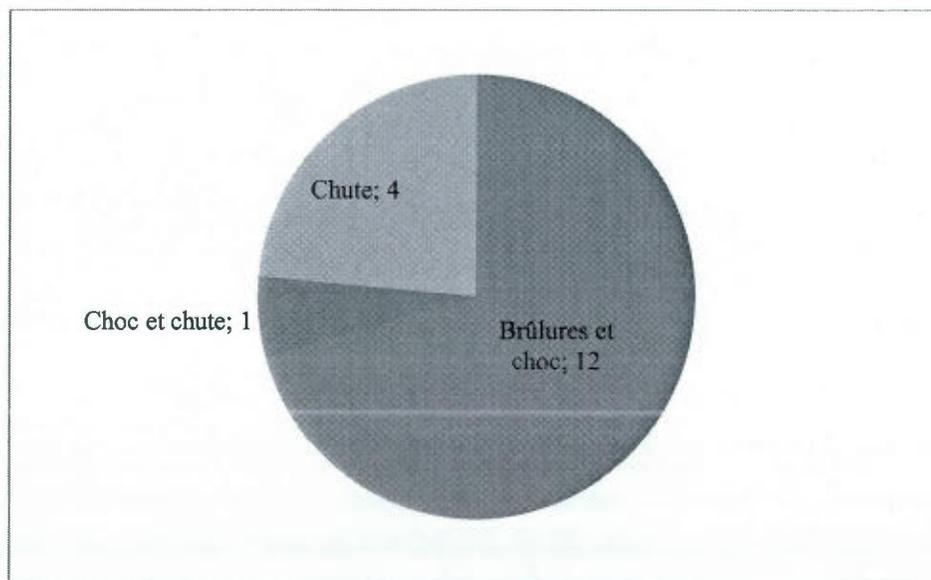


Figure 20 Causes des blessures subies par le travailleur

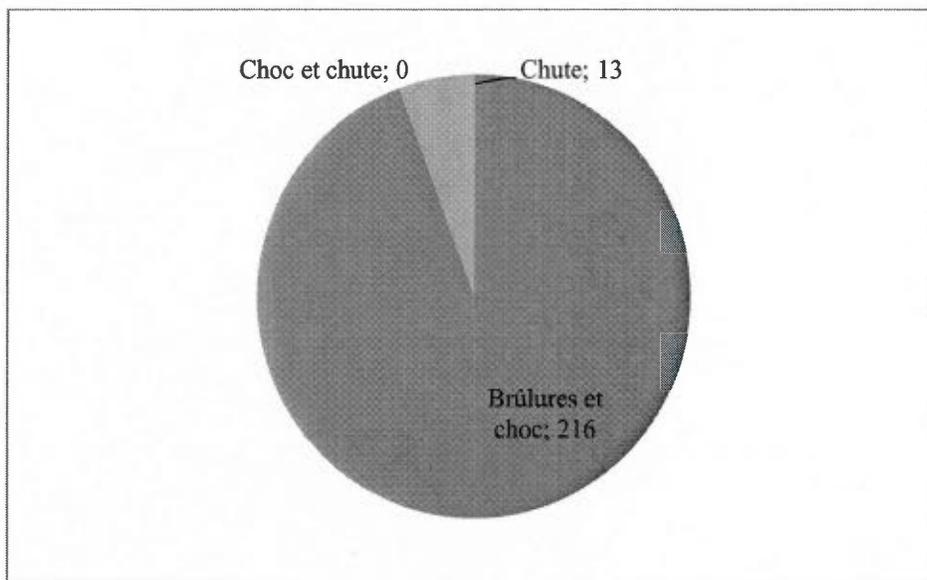


Figure 21 Causes du décès du travailleur

La figure 21 démontre clairement que le choc ou les brûlures sont les causes les plus importantes de décès des travailleurs ayant subi un choc électrique. Bien que ces mêmes brûlures et chocs soient également la plus importante cause de blessure, on voit que les chutes y occupent une part plus importante.

La figure 9 avait présenté les causes selon le type de réaction musculaire. En concentrant notre attention plus spécifiquement sur les cas où il y a eu projection ou tétanisation, on peut mieux observer la différence entre chacune de ces situations, tel que cela est démontré par la figure 22.

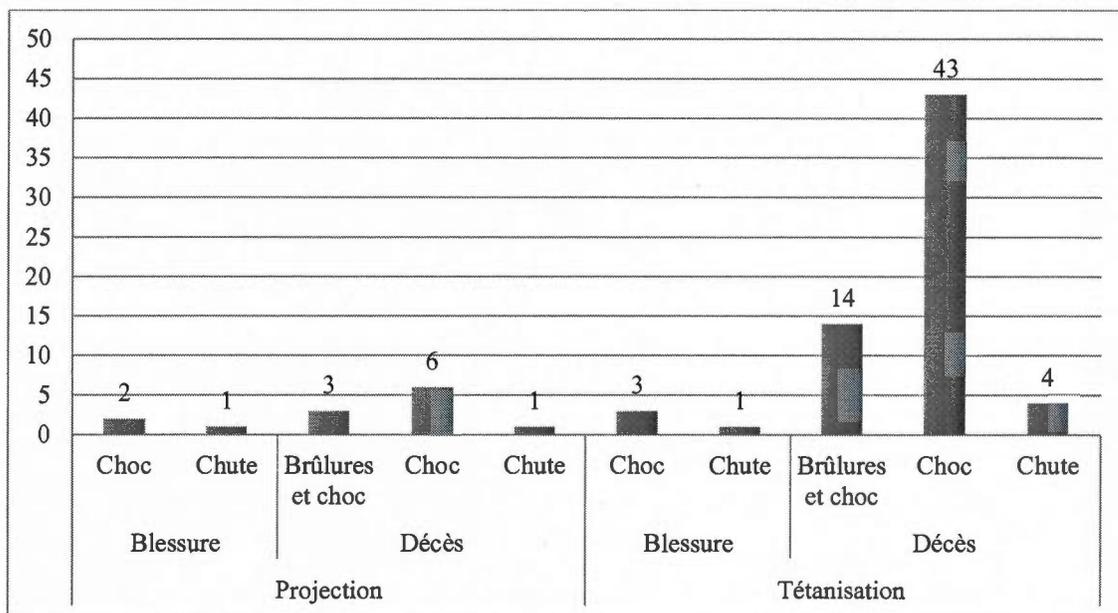


Figure 22 Causes de la blessure ou du décès pour les cas de projection ou de téτανisation

Malgré le nombre restreint de cas inclus dans la comparaison, les résultats de la figure 22 démontrent une nette représentativité avec un $p < 0,05$. Il est donc juste d'affirmer que le type de réaction musculaire aura une influence sur la cause de la blessure ou du décès de la victime, selon le cas. Selon ces données, dans un cas de téτανisation, le choc sera majoritairement la cause du décès du travailleur alors que ce même décès peut être causé par une combinaison de brûlures et de choc dans le cas d'une projection.

5.6 Points d'entrée et de sortie du courant

Selon la littérature traitant de l'effet du courant sur le corps humain (Fish et al., 2009b; IEC/TS 60479-1, 2005), un des aspects importants qui détermine les conséquences du choc est le parcours que prendra le courant électrique en circulant à travers le corps. On peut en effet s'attendre à ce que les conséquences soient potentiellement plus graves si le courant circule à travers des organes vitaux comme le cœur. Par contre, est-ce que ce chemin parcouru par le courant électrique peut influencer le type de réaction musculaire de la victime? Les tableaux 11 à 13 ainsi que la figure 10 ont fournis certaines données à ce sujet.

Tel que mentionné au chapitre 4, les résultats concernant les points d'entrée et de sortie en fonction du type de réaction musculaire ne sont pas statistiquement significatifs. Le travail effectué par les victimes au moment du contact avec les éléments sous tension impliquant pratiquement toujours au moins une main, il est normal que le haut du corps soit impliqué dans la quasi-totalité des accidents. Toutefois, intuitivement, je me serais attendu à une plus grande proportion de cas impliquant les jambes pour les cas de projection. Puisque ces muscles sont plus puissants, il me semblait probable que ceux-ci aient un rôle à jouer dans le mouvement de projection de la victime. Dans les faits, la proportion de cas où le bas du corps représentait un point d'entrée ou de sortie du courant, est sensiblement la même pour les réactions de projection ou de téτανisation.

D'autres facteurs relatifs aux points d'entrée et de sortie auraient possiblement pu être étudiés (position de la main, position de la victime au moment du contact). Cependant, l'information contenue dans les rapports n'étant pas disponible, il n'a pas été possible de pousser d'avantage cette analyse.

5.7 Source du rapport d'accident

Bien que cela n'ait rien à voir avec l'incident lui-même, je trouvais important de pouvoir comparer les résultats en fonction de la source des rapports. J'ai mentionné plus tôt que les données pouvaient être influencées par le fait que les organismes gouvernementaux ne procédaient à un rapport détaillé que lors d'incidents graves, voire de décès. Dans ce cas, cet échantillonnage des accidents devrait possiblement générer une différence entre les résultats de l'analyse provenant des rapports de ces organismes et ceux obtenus des rapports d'ABB où ce filtre, bien que présent, devrait avoir moins d'importance. Dans le cas des données provenant de NIOSH, seuls des incidents ayant entraîné le décès du travailleur sont rapportés dans la base de données. Cela devrait donc aussi influencer les résultats. Vérifions ce qu'il en est.

Prenons d'abord comme référence la proportion globale de chacune des sources sur le nombre total de rapports étudiés. En principe, on devrait s'attendre à une répartition des éléments étudiés qui soit proportionnelle à celle présentée à la figure 1. Selon cette figure, pour chacun des points analysés, nous devrions avoir une répartition à peu près égale entre les rapports provenant de NIOSH et de la CSST (respectivement 48% et 44%) et environ 8% de cas provenant des rapports d'ABB (oublions les cas provenant d'autres sources dont la proportion est négligeable).

Le premier point analysé est le nombre de cas répertoriés pour chacun des types de réaction musculaire. Les figures 23 à 25 présentent la proportion de rapports provenant des différentes sources pour chaque type de réaction musculaire observée.

Selon ces données, les cas où la réaction musculaire est inconnue ou encore où aucune réaction n'a été observée se répartissent de manière à peu près semblable aux données attendues. Comme ce type de réaction représente 65% des cas répertoriés, il est normal que la répartition observée dans cette catégorie soit proche de la répartition

globale. Avec $p=0,75$ ($p>0,05$), la différence entre les valeurs observées et celles attendues n'est pas statistiquement significative (ce à quoi on pouvait s'attendre).

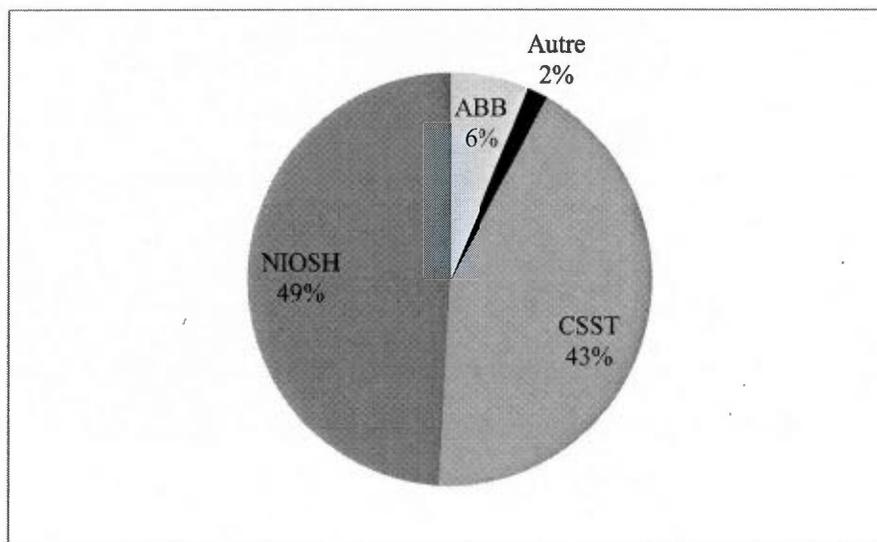


Figure 23 Répartition des cas de réaction inconnue/aucune en fonction de la source du rapport

Si la figure 23 montre que la répartition des sources des rapports suivait sensiblement la tendance prévue par les données globales pour les situations de réaction musculaire inconnue/aucune, la situation est différente lorsqu'une réaction est identifiée. La figure 24 présente les cas où il y a eu projection; On y remarque que la représentation des cas provenant des rapports de NIOSH est nettement sous-représentée par rapport à la valeur attendue alors que celle des rapports provenant d'ABB y est de beaucoup supérieure. La proportion de rapports provenant de la CSST pour ce type de cas est identique à sa valeur pour l'ensemble des cas. Avec $p<0,05$, l'écart par rapport aux valeurs attendues est statistiquement significatif.

La figure 25 présente les résultats pour les cas où il y a eu téτανisation. Comme pour les cas où la réaction était inconnue, les situations où il y a eu téτανisation se

rapprochent des valeurs attendues par rapport à l'ensemble des rapports. L'écart observé ($p > 0,05$) n'est pas statistiquement significatif.

À la section 5.4, il a été mentionné que les chances de survie du travailleur étaient nettement meilleures lorsqu'il y a projection (33%) que lorsque'il y a tétanisation (6%). Comme les rapports compris dans la base de données NIOSH comportent uniquement des accidents ayant causé le décès du travailleur, il semble normal que ces rapports soient sous-représentés pour les cas de projection. Inversement, l'accès aux rapports d'ABB a permis d'obtenir de l'information sur des accidents de différente nature. La représentativité de cette source de rapports pour les cas de projection s'en trouve donc accrue. Dans les cas de projection (par rapport à l'ensemble des rapports), la baisse de la proportion de cas provenant de NIOSH est entièrement compensée par une augmentation de ceux provenant d'ABB (les rapports provenant de la CSST étant dans une proportion similaire à celle attendue).

Les cas provenant de la CSST représentent une situation particulière; Les rapports provenant de cette source n'étaient pas nécessairement des accidents fatals. Cependant, la CSST ne produit des rapports officiels publics que dans des situations où l'accident a eu des conséquences importantes ou aurait pu en avoir. Vu le caractère plus « universel » des rapports émis, on s'attend à ce que la proportion des rapports provenant de la CSST soit semblable, peu importe le type de réaction musculaire. Or, les données des figures 23 à 25 confirment cette supposition, la proportion oscillant entre 43% et 46% des rapports.

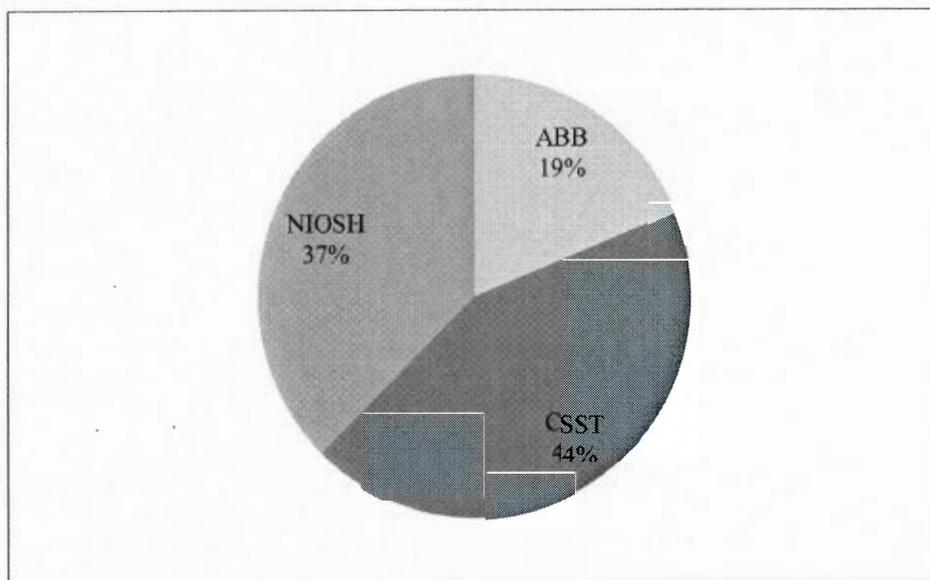


Figure 24 Répartition des cas de projection en fonction de la source du rapport

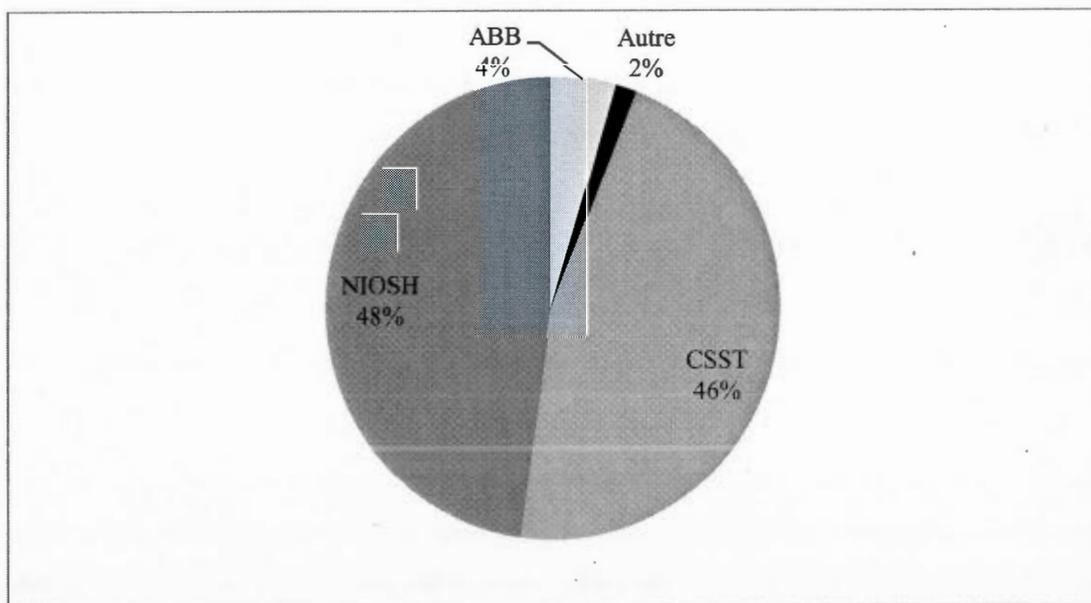


Figure 25 Répartition des cas de tétanisation en fonction de la source du rapport

Le tableau 14 a présenté les données relatives à la répartition de la conséquence du choc en fonction de la source du rapport. En utilisant le même raisonnement que celui utilisé précédemment, on peut comparer la proportion de chaque type de conséquence selon la source dont le rapport a été tiré. Les figures 26 à 28 montrent ces résultats.

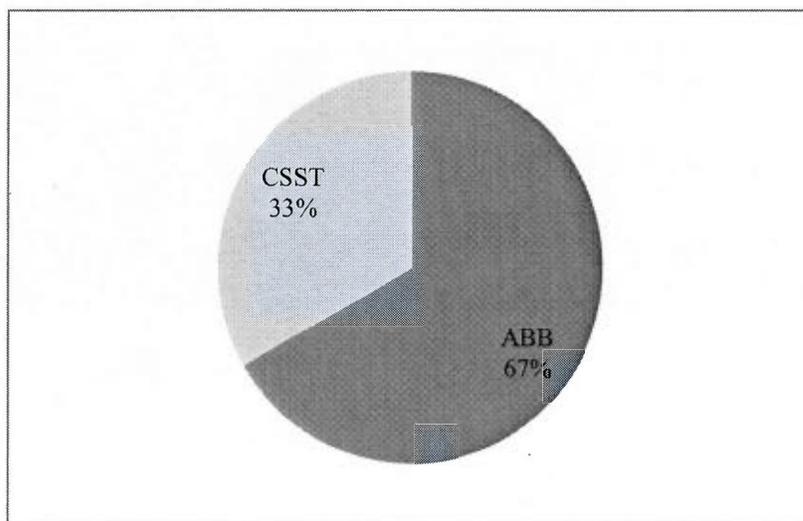


Figure 26 Répartition de la source du rapport pour les cas n'ayant entraîné aucune blessure

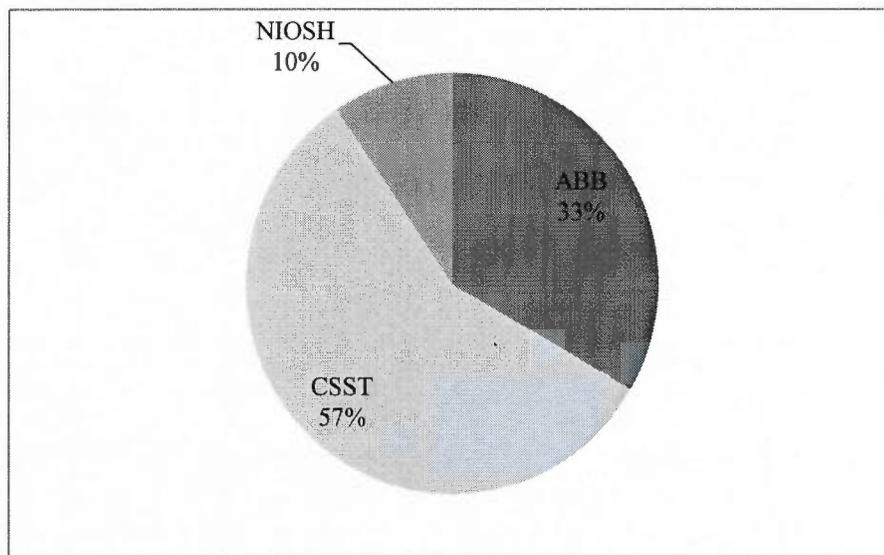


Figure 27 Répartition de la source du rapport pour les cas ayant entraîné des blessures au travailleur

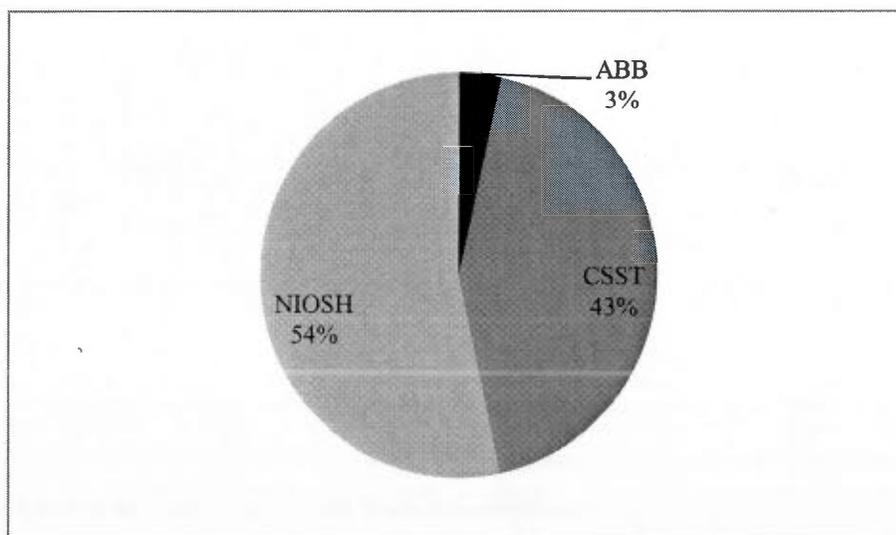


Figure 28 Répartition de la source du rapport pour les cas ayant entraîné le décès du travailleur

Les résultats de la figure 26 corroborent l'hypothèse selon laquelle, puisque les rapports analysés ne se limitent pas exclusivement à des incidents ayant entraînés des conséquences graves, la proportion d'accidents « sans conséquence » provenant d'ABB devrait être plus importante. Bien que cette interprétation aille dans le sens de ce qui était attendu et qu'elle soit statistiquement significative ($p < 0,05$ en terme de pourcentages relatifs), elle doit toutefois être considérée avec prudence étant donné que seulement trois cas y sont rapportés.

La figure 27 confirme la tendance rapportée par la figure 26. La répartition des cas où le travailleur a subi des blessures sans pour autant être décédé laisse une faible place aux cas provenant des rapports de NIOSH avec à peine 10% des cas. En fait, considérant que la base de données utilisée pour NIOSH ne prenait en compte que des accidents fatals, on peut même s'étonner qu'il reste 10% de cas de blessures. L'explication vient du fait que pour ces cas, il y avait plus d'un travailleur impliqué dans l'accident. Si l'un des travailleurs en est décédé, l'autre n'a subi que des blessures. L'écart par rapport à la répartition globale des rapports est ici encore statistiquement significatifs avec $p < 0,05$.

En fait, ce qui étonne de l'analyse des résultats de la figure 27, c'est d'avantage la proportion importante des cas provenant des rapports d'ABB. La proportion y est en effet beaucoup plus importante (33%) que la proportion globale des rapports provenant de cette source (17%).

À l'inverse des résultats de la figure 27, la proportion importante (54%) des cas provenant de NIOSH pour les accidents ayant entraîné le décès du travailleur (figure 28) n'étonne pas. On y remarque cependant que les cas provenant d'ABB y sont très rares alors que la proportion de cas provenant de la CSST est proportionnelle à celle correspondant à l'ensemble des résultats. Les résultats étant similaires aux

résultats de la répartition globale de la source des rapports, la différence par rapport à cette répartition n'est pas statistiquement significative.

Dans l'ensemble, les résultats présentent des différences statistiquement significatives en ce qui a trait à la comparaison des conséquences des accidents répertoriés pour chacune des sources. Avec un χ^2 de 87,5 pour 4 degrés de liberté, on obtient un $p < 0,05$.

5.8 *Impact de l'environnement sur le type de réaction musculaire*

Au tableau 1, il avait été mentionné que le seuil de non-lâcher se situait à environ 10mA. C'est donc dire que pour observer ce phénomène, la tension doit être suffisante pour permettre à un courant de 10mA de circuler à l'intérieur du corps. Or, l'explication des notions théoriques faite au chapitre 2 démontre que ce courant est facilement atteint pour des tensions relativement faibles. On peut donc considérer que chaque cas observé dans les analyses peut potentiellement provoquer une tétanisation. Si tel est le cas, comment se fait-il que dans la majorité des situations, on ne puisse identifier avec certitude qu'une réaction musculaire a bel et bien eu lieu? L'absence de témoin ou le simple fait que cette réaction n'ait pas été rapportée peut certainement expliquer une partie de cette situation, mais est-ce la seule explication?

Une des possibilités qui pourrait expliquer pourquoi certaines situations n'ont pas générées de réaction musculaire alors que dans d'autres cas similaires (en terme de niveau de tension ou de passage du courant), des réactions ont pu être observées est liée à l'environnement dans lequel l'incident a eu lieu, notamment si ce dernier est survenu à l'intérieur ou à l'extérieur. Le travail effectué à l'extérieur peut présenter plusieurs caractéristiques qui peuvent favoriser une baisse de l'impédance de la peau

(chaleur, humidité, pluie, etc.). Cette baisse de l'impédance favorise, pour une même tension de contact, le passage d'un courant plus important. Inversement, le travail effectué à l'intérieur est moins sujet à présenter ce type de situations. Comment se répartissent les différents types de réactions musculaires pour les incidents survenus à l'intérieur ou à l'extérieur? C'est ce que démontre la figure 29. À noter que les cas pour lesquels le lieu est inconnu ont été retirés.

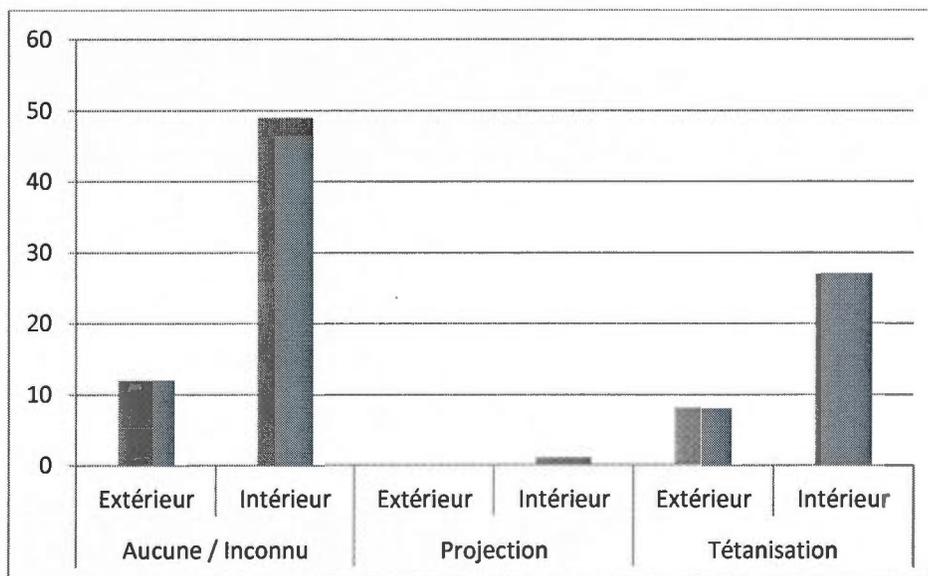


Figure 29 Répartition du type de réaction musculaire en fonction du lieu de l'incident

Les résultats présentés à la figure 29 se limitent à ceux correspondant aux événements impliquant une tension de moins de 1000 volts. Comme l'hypothèse est que les conditions extérieures pourraient entraîner une baisse de l'impédance de la peau et ainsi une augmentation du courant généré par la tension de contact, il m'a semblé que pour les incidents impliquant une tension supérieure à 1 000 volts le

niveau de tension générera un courant suffisamment important pour minimiser l'impact des conditions de l'environnement.

Bien qu'il s'agisse d'une piste d'explication à première vue prometteuse, les résultats obtenus ne sont pas statistiquement significatifs ($p > 0,05$). Il en est de même si on considère l'ensemble des données. Cette hypothèse doit donc être laissée de côté.

5.9 Informations complémentaires provenant de l'analyse

Un certain nombre d'autres informations ont pu être tirées de l'analyse sans qu'elles ne soient incluses dans les résultats présentés jusqu'ici. Bien qu'intéressantes, ces informations n'apportent pas d'information additionnelle sur le sujet de l'analyse principale à savoir l'effet du choc électrique sur les contractions musculaires. Par contre, ces informations sont pertinentes du point de vue de l'analyse globale car elles témoignent de certaines tendances en ce qui concerne les accidents de nature électrique.

Outre les éléments liés directement à l'événement (circonstances de l'accident), le type d'information recueillie varie grandement selon la source du rapport; Si les rapports provenant de sources corporatives incluent la plupart des informations requises, cela n'est pas le cas pour les rapports gouvernementaux. Ces rapports étant disponibles au public, un certain degré de confidentialité est nécessaire par l'organisme gouvernemental afin de protéger la vie privée des victimes ou des personnes impliquées. Ce qui est surprenant, c'est que ces « données confidentielles » ne sont pas les mêmes selon qu'on consulte la base de données de NIOSH ou celle de la CSST. Ces deux organismes semblent donc avoir des critères de confidentialité assez différents. En fait du point de vue de la confidentialité, la

CSST semble imposer d'avantage de limites que ne le fait NIOSH qui diffuse notamment l'âge, l'origine ethnique ainsi que l'expérience de la victime.

Chapitre 6

Comparaison entre la théorie et les résultats des analyses

Plusieurs éléments ont été discutés au cours des chapitres précédents. J'ai toutefois laissé de côté les informations théoriques recueillies dans la littérature. Je tenterai dans ce chapitre de reprendre ces données théoriques et de vérifier de quelle façon les données recueillies grâce aux analyses de cas viennent, lorsque cela s'applique, corroborer ou non ces données.

6.1 *Effets du courant alternatif VS courant continu.*

Un des objectifs de la recherche était de voir si le courant alternatif et le courant continu avaient une influence différente sur le type de réaction musculaire observée. Les données les plus pertinentes sur ce sujet viennent du rapport de la Commission électrotechnique internationale (CEI) intitulé *Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques – Partie 1 : Aspects généraux* (IEC/TS 60479-1, 2005). Selon ce rapport (page 85), « il n'est pas possible d'établir un seuil de non-lâcher en courant continu. Seuls l'établissement et l'interruption du courant provoquent des douleurs et des contractions musculaires ».

Ce que nous dit la CEI c'est qu'en courant continu, il n'y aura pas de téτανisation puisqu'il n'y a pas de variation de courant nécessaire pour provoquer la dépolarisation des fibres musculaires. Cette donnée est corroborée par la figure 10 du second rapport de la CEI, 479-2 *Effet du courant passant par le corps humain* (CEI 479-2, 1987). Cette figure montre la variation du seuil de non-lâcher pour des

fréquences comprises entre 50/60 Hz et 1 000 Hz. Selon cette figure, le seuil de non-lâcher reste relativement stable à des fréquences faibles. Puis, lorsque la fréquence atteint entre 200Hz et 500Hz, on assiste à une augmentation rapide de ce seuil. Sachant que la fréquence de stimulation se situe en dessous du 50/60 Hz, l'augmentation de la fréquence tend probablement à rapprocher l'effet du courant alternatif de celui du courant continu. Autrement dit, lorsque la fréquence du courant augmente, l'alternance du courant est si rapide qu'elle est de moins en moins perçue par les fibres musculaires ou les neurones transmetteurs pour lesquelles le courant se rapproche alors d'une forme continue.

Finalement, le même rapport de la CEI mentionne que « La résistance totale du corps humain R_t en courant continu est plus élevée que l'impédance totale du corps humain Z_t en courant alternatif pour des tensions de contact jusqu'à environ 200 V en raison du pouvoir bloquant des capacités de la peau humaine » (CEI 479-2, 1987, page 80). Cette résistance plus élevée en courant continu contribue elle aussi au fait que le niveau de tension nécessaire pour provoquer une contraction musculaire (en générant un courant donné) devra être plus élevé, relevant ainsi le seuil de non-lâcher décrit dans la norme. Cette affirmation n'est toutefois valide que pour des tensions inférieures à 200 volts. Au-delà de cette valeur, l'importance du niveau de tension fait baisser la résistance de la peau pour la rapprocher de celle de l'impédance en courant alternatif.

En 1943, Charles Dalziel, Eric Ogden et Curtis Abbott (Dalziel et al, 1943) avaient déjà abordé le sujet de l'impact de la fréquence sur les risques de contraction musculaire. Dans leur article, ils concluent en affirmant;

Let-go current are affected by frequency. Unfortunately, the power frequencies appear to be the most dangerous. Larger currents may be tolerated for both the higher and the lower frequencies and for direct current. (Dalziel et al, 1943, page 249-50)

Cette affirmation semble aller dans le même sens que les conclusions de la CEI rapportées précédemment.

Les résultats observés grâce à l'analyse des rapports n'a pas permis de statuer sur la question de la différence de l'impact entre courant continu et alternatif. L'analyse portait sur des cas d'accidents de travail; Or, comme les installations électriques fonctionnent en général en courant alternatif, c'est à ce type de courant que sont exposés les travailleurs. De tous les cas étudiés, seul un de ces cas est survenu en courant continu. À première vue, le résultat de ce contact avec le courant continu semble contredire la théorie avancée par le rapport de la CEI puisque la victime y a subi une tétanisation. Cependant, une note importante mentionnée dans ce rapport indique que les données fournies par le rapport concernent le courant continu lisse. Dans le cas de l'accident étudié, le courant continu était généré par un système maison constitué d'un redresseur et d'un transformateur. L'ensemble était branché à la prise murale et devait convertir le 120 VAC en 600 VDC. Toutefois, vu la qualité rudimentaire de l'équipement, une composante résiduelle en courant alternatif était présente. C'est cette composante résiduelle qui selon toute vraisemblance explique l'effet de tétanisation.

Selon Fish et Geddes (2009b), la majorité des cas de tétanisation surviennent en courant alternatif. Bien que cette information concorde avec ce qui a été observé grâce à l'étude des rapports, elle n'a en réalité que peu d'intérêt puisque la très vaste majorité des expositions de travailleurs au courant électrique surviennent en courant alternatif.

Le nombre de rapports étudiés ne permet malheureusement pas d'apporter plus d'information sur l'effet du courant continu lors d'un choc électrique. Cet objectif de la recherche n'a donc pu être atteint.

6.2 Effets du niveau de tension

La documentation concernant les effets d'un choc électrique sur les contractions musculaires se concentrent presque exclusivement sur le phénomène de tétanisation (non-lâcher). Ce point a été discuté dans les chapitres précédents. Pour ce qui est de la projection, la littérature ne fournit pas d'information « officielle » sur un seuil qui permettrait d'expliquer cette réaction. Des échanges avec des « spécialistes » travaillant dans le domaine de la santé et de la sécurité m'ont permis de constater qu'intuitivement, la plupart des personnes consultées tendent à croire qu'un niveau de tension plus élevé augmentera la probabilité d'avoir une réaction de projection. Rien dans la littérature ne semble toutefois vouloir confirmer cette hypothèse.

La loi d'Ohm décrite au chapitre 2 définit une relation directe entre la tension et le courant pour une résistance donnée (donc en fonction d'une situation particulière). Sur cette base, il est clair qu'une tension plus importante générant un courant plus grand, la probabilité de voir une réaction musculaire survenir sera plus grande. Rien toutefois ne permet de dire si cette réaction sera une projection ou une tétanisation.

Les résultats présentés aux chapitres 4 et 5 ont fait ressortir l'impact du niveau de tension sur le type de réaction musculaire. Ces résultats montrent clairement que lors d'un contact avec une source à basse tension, une réaction musculaire sera presque exclusivement une tétanisation. Plus le niveau de tension sera élevé, plus la probabilité que la victime subisse une projection augmente si bien que lors d'un contact avec une source à haute tension, la victime a approximativement autant de chance de subir une tétanisation qu'une projection.

Le niveau de tension seul ne permet pas d'expliquer complètement la différence entre les cas de projection ou de tétanisation. D'autres facteurs peuvent entrer en jeu et faire en sorte que pour une même tension, la réaction musculaire sera différente. À la fin du chapitre 5, la possibilité que l'environnement puisse influencer le type de réaction musculaire en raison des conditions (chaleur, humidité) a été invoquée. Les résultats ne démontraient aucune corrélation qui puisse être établie entre ces facteurs. Le rapport de la CEI (IEC/TS 60479-1, 2005) confirme en partie ces résultats. En effet, une figure présentée dans ce rapport montre que si l'humidité influence l'impédance totale du corps pour des tensions faibles, les résultats des courbes pour des conditions sèches et des conditions humides tendent à se rejoindre lorsque la tension dépasse environ 110 volts (pour un trajet main à main et pour une surface de contact importante). Autrement dit, pour des tensions supérieures à 110 volts (qui représentent pratiquement 100% des cas étudiés), l'environnement n'aura pas d'influence sur l'impédance et donc, sur le courant circulant à travers le corps pour un niveau de tension donné. Ce résultat à première vue surprenant explique pourquoi aucune différence statistiquement significative n'a pu être observée en fonction du milieu.

6.3 Conséquences du choc électrique

Dans leur ouvrage « *Electrical injuries: Medical and Bioengineering aspects* », Fish et Geddes (2009b) expliquent (sans entrer dans les détails) que lors d'une situation de tétanisation, les conséquences d'un choc électrique peuvent être plus importantes que lorsqu'aucune réaction musculaire ne survient. La raison évoquée par les auteurs est que la chaleur subie par les tissus est proportionnelle à la durée du contact. Comme la tétanisation prolonge la durée du contact, les conséquences risquent évidemment d'être plus importantes.

Les résultats obtenus lors de l'analyse des cas d'accidents confirment l'affirmation de Fish et Geddes (2009b). La proportion de décès VS blessures ou aucune blessure suppose que la victime ayant subi une projection (où la durée du contact est de courte durée) a 5 fois plus de chance de survie que lors d'une réaction de tétanisation. Ces résultats ont déjà été expliqués au chapitre 5 grâce aux informations contenues dans la figure 16. Suite à ces résultats, si on ne peut affirmer avec certitude que la victime a plus de chances de survie suite à un contact à haute tension avec projection qu'à un contact à basse tension avec tétanisation, on peut à tout le moins mentionner que les résultats ne démontrent pas non plus qu'une tension élevée entraîne forcément des conséquences plus importantes comme l'intuition nous le laisserait présager.

6.4 Influence des points d'entrée et de sortie du courant

Dans leur texte « *Conduction of Electrical Current to and Through the Human Body : A Review* », Fish et Geddes (2009a) mentionnent que :

« However, within 10 to 100 millisecond, muscles in the current path will strongly contract. The person may be stimulated to grasp the conductor more tightly, making a stronger mechanical contact. Or, the person may be propelled away from the contact. Which of these events occurs depends on the position of the hand relative to the conductor. » (Fish et al., 2009a, page 9)

Bien que cette affirmation soit vraie, l'intuition me portait à croire que d'autres facteurs, notamment les points d'entrée et de sortie du courant auraient pu influencer le type de réaction musculaire. Puisque les muscles du bas du corps ne participent pas directement à la réaction de tétanisation et qu'ils sont beaucoup plus forts que ceux du haut du corps, je m'attendais à ce que ceux-ci soient impliqués dans d'avantage de cas de projection. Bien qu'il y ait une différence dans la proportion de

cas impliquant le bas du corps entre les situations de projection et de tétanisation tel que présenté à la figure 10, celle-ci n'est pas suffisante pour être statistiquement significative. On ne peut donc conclure que les points d'entrée et de sortie du courant ont un impact sur le type de réaction musculaire.

Les situations où aucun des points d'entrée ou de sortie du courant n'était connu se retrouvent dans la vaste majorité des cas (93%) dans des situations où la réaction musculaire n'était pas connue non plus. Étant moi-même une personne impliquée dans la gestion de la santé et de la sécurité au travail, deux raisons principales peuvent à mon avis expliquer cette situation : La première est liée aux circonstances dans lesquelles survient l'accident. On a vu en effet que plusieurs des accidents surviennent sans qu'un témoin direct ne puisse témoigner des détails de l'incident. Un témoin aurait par exemple pu expliquer dans quelle position se trouvait la victime au moment du contact avec l'électricité. De par cette position, il aurait alors été facile de déduire quelles parties du corps sont entrées en contact avec les éléments sous tension.

La deuxième raison est liée au manque d'intérêt des personnes chargées de l'enquête (les inspecteurs de la CSST dans le cas des incidents survenus au Québec) pour cette information. Si à leurs yeux cette information n'apporte pas de valeur directe à l'enquête, elle ne sera tout simplement pas inscrite dans le rapport. Pourtant, cette information devrait être assez facilement disponible pour quelqu'un qui voudrait l'ajouter au rapport; Même sans témoin direct de l'accident, le contact avec des éléments sous tension laisse généralement des traces (brûlures légères ou sévères). De par la position de ces brûlures, on pourrait ainsi connaître facilement les points d'entrée et de sortie du courant. De plus dans le cas d'un décès, un rapport d'autopsie peut être pratiqué sur le corps de la victime, ou à tout le moins, un médecin confirmera la cause du décès. Cette cause réelle, de même que les informations fournies par le médecin peuvent être d'une grande utilité pour reconstituer les

événements et ainsi chercher à éviter que des situations semblables ne se reproduisent. On retrouve ce genre d'information dans plusieurs rapports provenant de NIOSH.

6.5 Influence de la source du rapport d'accident

L'analyse des résultats présentée au chapitre 5 a clairement démontré que la source des rapports utilisés dans l'analyse a un impact significatif sur les données obtenues en ce qui touche les conséquences du choc électrique. Les « filtres » définissant quels incidents feront l'objet ou non d'un rapport de l'organisme impliqué modifient la gravité globale des incidents rapportés et dès lors, influencent la répartition des cas selon le type de réaction musculaire.

Idéalement, les rapports analysés auraient comporté une plus grande proportion de rapports provenant de sources corporatives. Malheureusement, les différents organismes consultés ont émis des réserves face à l'utilisation des informations qui auraient pu être utilisées dans le cadre de cette recherche. Dès lors, la répartition des informations provenant de sources autres que les organismes gouvernementaux s'en est trouvée compromise. Une suite intéressante à la présente recherche serait de poursuivre ce travail en recueillant d'avantage de données provenant d'entreprises qui œuvrent dans des secteurs où les travailleurs sont exposés à l'électricité. On aurait ainsi un échantillonnage plus significatif qui permettrait de valider les informations recueillies grâce à une meilleure représentativité. Un plus grand nombre de cas de projection permettrait notamment de déterminer avec plus de précision quels facteurs peuvent entraîner ce type de réaction musculaire. L'analyse de quelques cas impliquant du courant continu pourrait aussi permettre de comprendre l'influence de ce type de courant sur la réaction musculaire.

6.6 Données sur le travailleur

Certaines informations sur le travailleur ont été compilées durant la recherche. Bien qu'elles n'aient pas à première vue d'impact sur le type de réaction musculaire, elles peuvent parfois avoir un impact sur les circonstances de l'accident.

La première observation est que tous les travailleurs ayant fait l'objet des rapports consultés, et ce sans exception, sont des hommes. Au Canada, le nombre d'hommes blessés au travail est de 67% plus élevée que la proportion de femmes (Ressources humaines et Développement des compétences Canada, 2013). De plus, la proportion de femmes œuvrant dans les métiers les plus fréquemment impliqués dans le genre d'accidents étudiés étant relativement faible, il était évident que la proportion d'hommes serait largement supérieure à celle des femmes. Toutefois, le fait qu'aucune des 259 victimes faisant partie des rapports étudiés ne soit une femme surprend.

La catégorie de métier était une autre donnée qui pouvait possiblement servir à regrouper certains types d'événements. Sans surprise, des métiers tels que les électriciens, les monteurs de ligne, le personnel de maintenance et les employés de la construction représentent une part importante des victimes d'accidents électriques. En tout, ces catégories comptent pour 64% des accidents électriques. En revanche, d'autres catégories d'emplois comptent pour une proportion des accidents électrique nettement plus importante que ce à quoi je m'attendais. C'est le cas notamment des émondeurs (ou élagueurs) ainsi que des camionneurs. Ces deux catégories représentent respectivement 5% et 6% des accidents de nature électrique.

L'expérience est un facteur qui peut certainement influencer la vigilance d'un travailleur face à ses situations de travail. Si ce facteur n'a pas été analysé d'avantage durant la recherche, c'est que la détermination de l'expérience du travailleur était

complexe. Très souvent en effet, cette expérience n'était pas mentionnée dans le rapport (en particulier pour les rapports de la CSST et étonnamment, pour les rapports d'ABB). Lorsque cette information était disponible, il devenait parfois difficile de l'interpréter. Parle-t-on de l'expérience sur le poste? Dans l'entreprise? De l'expérience totale? Un rapide survol des données ne semble pas démontrer de tendance claire, l'expérience des travailleurs impliqués variant d'un jour à quarante ans.

L'origine ethnique des travailleurs a été mentionnée lorsqu'elle était disponible. Si cette information n'est pas disponible dans les rapports de la CSST (il s'agit selon leurs critères d'une information confidentielle), elle est souvent mentionnée dans les rapports de NIOSH. La raison pour laquelle j'ai porté attention à ce paramètre est la suivante : Dans plusieurs rapports de NIOSH, la description des événements rapportait le fait que l'introduction des travailleurs et la communication des règles de sécurité se faisait en anglais alors que dans plusieurs cas, les travailleurs étaient de nouveaux immigrants hispanophones qui ne comprenaient pas l'anglais. Sans calculer la proportion de ce type de situation, je peux tout de même prétendre qu'il s'agit d'une cause fréquente identifiée par les auteurs des rapports et certainement une source de risque additionnel pour les travailleurs concernés. Une attention particulière devrait être apportée à ce facteur, autant pour les entreprises qui recrutent de nouveaux arrivants que par les organismes gouvernementaux qui veillent à leur intégration.

Conclusions et recommandations

L'objectif de la recherche était de déterminer si certains éléments inclus dans les rapports d'accidents de travail permettaient de déterminer si certains facteurs influencent le type de réaction musculaire subie par le travailleur. Après avoir présenté quelques notions théoriques et effectué un survol de la littérature existante sur le sujet, j'ai analysé les informations comprises dans les rapports d'accidents pour déterminer celles qui permettraient de confirmer ou d'infirmer les notions théoriques.

Le premier point qui ressort de cette analyse est que conformément à ce que semblent croire les gens travaillant dans le milieu de la santé-sécurité ou de l'électricité en général, le niveau de tension a bel et bien une influence sur le type de réaction musculaire. Si des niveaux de tension bas (moins de 1000 volts) semblent plus propices à une réaction de tétanisation, la probabilité que le travailleur subisse une projection augment lorsque le niveau de tension augmente. Toutefois, peu importe le niveau de tension subit, la probabilité de subir une tétanisation est toujours supérieure à la probabilité de subir une projection.

Le second point observé concerne les points d'entrée et de sortie du courant. Si la littérature mentionne que ces points d'entrée et de sortie ont un impact sur les conséquences du choc, cela ne semble pas être le cas en ce qui concerne le type de réaction musculaire subie par la victime.

Le troisième point, qui représente un des principaux objectifs visés, consistait à déterminer la différence de l'impact du courant alternatif et du courant continu. Certaines notions théoriques ont permis de tracer un portrait de cette différence. Toutefois, comme aucun des cas étudiés ne faisait référence à du courant continu, il

n'a pas été possible de déterminer cette influence. Cette dernière affirmation me laisse cependant avec une question : Est-il possible que, outre le fait que les situations impliquant du courant continu soient plus rares, une autre raison pouvant expliquer l'absence de cas impliquant du courant continu soit due à ce que celui-ci a moins tendance à entraîner des conséquences graves pour le travailleur? Dans l'affirmative, cela pourrait expliquer l'absence de cas dans les bases de données de NIOSH et de la CSST, puisque celles-ci regroupent principalement des cas d'accidents graves.

Un autre point qui a fait l'objet de la recherche, bien qu'il ne s'agisse pas d'un des objectifs initiaux, consistait à définir les causes des blessures ou du décès suite au choc. Généralement, ces causes se divisent en trois catégories soient les chocs, les brûlures et les chutes. Si l'intuition pousse à croire que les situations de projection devraient logiquement être plus fréquemment la cause des chutes, les résultats observés n'ont pas permis de confirmer cette intuition. En fait, l'analyse des rapports d'accidents ne permet pas de tirer de réelle tendance en ce qui concerne les causes des blessures ou du décès.

De manière plus générale, les informations contenues dans les rapports d'accidents, si elles permettent de bien reconstruire la séquence des événements, ne permettent pas de déterminer les facteurs ayant un lien direct avec le choc électrique. La position précise du travailleur au moment de l'incident, les points d'entrée et de sortie du courant (de manière précise), les facteurs environnementaux (chaleur, humidité), le port d'équipements de protection, et même le type de réaction suite au choc auraient permis de mieux comprendre les circonstances entourant l'événement et d'en tirer de meilleures informations qui auraient pu aider à préciser certaines hypothèses.

7.1 Recommandations

Lors de leur intervention suite à un accident de travail, les inspecteurs responsables des enquêtes d'accidents se concentrent sur la reconstruction des événements qu'ils jugent directement en lien avec l'accident. Pour avoir vécu de telles enquêtes, la recherche des informations se fait trop souvent à la manière d'une enquête policière, c'est-à-dire en cherchant à reconstituer les faits pour déterminer si l'entreprise doit être ou non mise à l'amende. En cherchant à reconstituer les faits d'une manière constructive et pour en tirer de réelles conclusions sur les éléments ayant contribué à l'accident, ces organismes pourraient contribuer à recueillir des données précieuses qui permettraient d'améliorer la sécurité des travailleurs. Outre l'accessibilité à l'information, cela constitue à mon avis une différence importante entre la pertinence des rapports gouvernementaux et corporatifs.

Certaines règles existent concernant les mesures de sécurité à utiliser pour travailler avec l'électricité. Malheureusement, ces règles sont souvent négligées, ce qui mène à des accidents qui sont trop souvent fatals. Au cours de ma carrière, j'ai participé de près ou de loin à des enquêtes d'accident de nature électrique à quatre reprises (heureusement, aucun de ceux-ci n'a été fatal). À chaque fois, le travailleur impliqué ne portait pas de gants électriquement isolants. Connaissant le point d'entrée le plus fréquent pour les chocs électriques (les mains), on voit facilement la pertinence d'une telle information. La sensibilisation des travailleurs et le renforcement des mesures de sécurité déjà connues constituent certainement un des aspects principaux à améliorer.

Une proportion de 40% des accidents analysés sont survenus à des tensions de moins de 1000 volts, dont 18 (sur 259) à des tensions de 120 volts ou moins. Ces tensions sont souvent perçues comme inoffensives par les travailleurs dû au fait qu'elles sont côtoyées tous les jours. Les résultats démontrent néanmoins qu'en

raison notamment des risques de téτανisation liés à ces tensions, le niveau de risque est important. Un meilleur encadrement et une meilleure vigilance ainsi qu'un renforcement des règles de sécurité élémentaires lors des travaux à basse tension est donc de mise. Des commentaires entendus dans différents milieux de travail par des personnes compétentes démontrent que même les travailleurs qui côtoient quotidiennement l'électricité en ont une perception qui ne correspond pas à la réalité et qui les places en situation de risque.

La différence entre courant alternatif et courant continu est un autre facteur méconnu. Des discussions avec des ingénieurs électriques, donc en principe des personnes qui connaissent bien l'électricité et pour qui des connaissances sur les dangers qui y sont associés paraissent évidentes, démontrent que les effets du courant continu et du courant alternatif sur le corps humain sont très mal connues. Cela n'a rien d'étonnant puisque même la littérature différencie mal les conséquences associées au type de courant, en particulier en ce qui touche les effets sur les contractions musculaires. La poursuite de la recherche afin d'approfondir ces connaissances me paraît nécessaire en vue de mieux cibler les mesures de protection requises.

Comme cela a été démontré par ce projet, la source des rapports d'accidents utilisée influence les résultats concernant le type de réaction musculaire observée ainsi que les conséquences des accidents. Pour cette raison, toute analyse ou recherche ultérieure traitant des conséquences des accidents de nature électrique devra tenir compte de ce facteur afin d'assurer une bonne représentativité des résultats.

En terminant, il est frustrant de constater que les compagnies d'électricité gérées par les gouvernements soient aussi peu coopératives face aux demandes d'informations liées aux accidents de travail. Si je peux comprendre la résistance des

entreprises privées face à ce genre de demandes, j'éprouve plus de difficultés à comprendre la réaction d'entreprises dont les actionnaires sont les contribuables (dans ce cas-ci, ceux-là mêmes qui demandent l'information). Inciter ces entreprises à offrir leur collaboration dans le cadre de projets de recherche dont elles pourront éventuellement bénéficier serait certainement une chose à considérer pour les gouvernements.

Références

Benton Laurel A. (1981). *Functional Electrical Stimulation – A Practical Clinical Guide*. (2^e éd.) Downey, California. Rancho Los Amigos Rehabilitation Engineering Center.

United States Department of labor - Bureau of Labor Statistics. (2007). *Census of Fatal Occupational Injuries 1992-2002*. Récupéré le 22 juillet 2011 de <http://www.bls.gov/iif/oshwc/cfoi/cftb0186.pdf>

Cawley, James C., Homce, Gerald T. (Août 2003). Occupational electrical injuries in the United States, 1992-1998, and recommendations for safety research. *Journal of Safety Research*. 34 (3), 241-248.

Centre de documentation de la CSST. (2013). *Centre doc. En ligne*. Récupéré le 19 février 2013 de http://www.csst.qc.ca/prevention/centre_documentation/accueil.htm.

Centers for Disease Control and Prevention, 6 novembre 2012. *Fatality and Control Evaluation (FACE) Program*. Récupéré le 14 janvier 2013 de www.cdc.gov/niosh/face.

Commission de la santé et de la sécurité au travail, 2013. *Commission de la santé et de la sécurité au travail*. Récupéré le 19 février 2013 de www.csst.qc.ca.

Commission Électrotechnique internationale. (1987). *Effets du courant passant par le corps humain, 2ie édition*. Genève : Commission Électrotechnique internationale, CEI 479-2,

Commission Électrotechnique internationale. (2005). *Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques, Édition 4.0*. Genève : Commission Électrotechnique internationale, IEC/TS 60479-1

Dalziel Charles, Ogden Eric, Abbott, Curtis (1943). Effect of Frequency on Let-Go Currents. *American Institute of Electrical Engineering Transactions*, volume 62, pages 745-749.

Fish Raymond, Geddes Leslie (2009a). *Conduction of Electrical Current to and Through the Human Body : A Review*. *Open Access Journal of Plastic Surgery*, Volume 9. Récupéré de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2763825/>.

Fish Raymond, Geddes Leslie. (2009b). *Electrical Injuries – Medical and Bioengineering Aspects, Second Edition*. Tucson (Arizona): Lawyers & Judges Publishing Company, inc.

Geddes LA, Bourland JD, Ford G., 1986. The mechanism underlying sudden death from electrical shock . *Journal of the Association for the Advancement of Medical Instrumentation*, (Nov-Déc); 20(6), pages 303-15.

Hydro-Québec. (2013). *Terminologie liée à l'électricité*. Récupéré le 1^{er} juin 2013 de www.hydroquebec.com/comprendre/notions-de-base/vocabulaire.html.

Marieb Elaine N. (1999). *Anatomie et physiologie humaine* (4^{ie} édition). Paris : Éditions du Renouveau pédagogique Inc.

NOAA Small Boat Program. (s.d). *NOAA Small Boat Program - Accident and Lessons Learned*. Récupéré le 26 novembre 2012 de http://www.sbp.noaa.gov/acc_lessons/index.html.

Ressources humaines et Développement des compétences Canada. (1^{er} juin 2013). *Indicateur de mieux-être au Canada : Travail – Accidents du travail* . Support : En ligne. Récupéré le 3 juin 2013 de http://www4.rhdcc.gc.ca/.3ndic.1t.4r@-fra.jsp?iid=20#M_2.

Ross, Marie-Josée. (2007). *La sécurité reliée à l'électricité : Comprendre et prévenir* (1^{ère} édition). Longueuil (Québec) : Association Sectorielle Paritaire Métal Électrique.

Ross, Marie-Josée (2011). *La sécurité reliée à l'électricité : Comprendre et prévenir* (2^e édition). Longueuil (Québec) : Association Sectorielle Paritaire Métal Électrique.

Serway Raymond. (1989). *Électricité et magnétisme* (2^e édition). Montréal (Québec): Les Éditions HRW.

Siegel Sidney. (1956). *Nonparametric Statistics for the behavioral sciences*. États-Unis d'Amérique: McGraw-Hill Book Company,

Snyder-Mackler Lynn. (1989). *Clinical Electrophysiology: Electrotherapy and Electrophysiologic testing*. Baltimore, USA: Rehabilitation Practice Series.

Worksafe BC (2013). *WorksafeBC Homepage*. Récupéré le 12 février 2013 de www.worksafebc.com