PolyPublie
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Analyse des accidents graves et mortels engendrés par les machines mobiles
Auteur: Author:	Taha Belmekki
Date:	2017
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Belmekki, T. (2017). Analyse des accidents graves et mortels engendrés par les machines mobiles [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/2481/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/2481/
Directeurs de recherche: Advisors:	Mohamed-Salah Ouali, & Yuvin Adnarain Chinniah
Programme: Program:	Maîtrise recherche en génie industriel

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ANALYSE DES ACCIDENTS GRAVES ET MORTELS ENGENDRÉS PAR LES MACHINES MOBILES

TAHA BELMEKKI

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE INDUSTRIEL)

JANVIER 2017

© Taha Belmekki, 2017.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ANALYSE DES ACCIDENTS GRAVES ET MORTELS ENGENDRÉS PAR LES MACHINES MOBILES

présenté par : BELMEKKI Taha

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

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

M. CLÉMENT Bernard, Ph. D, président

M. OUALI Mohamed-Salah, Doctorat, membre et directeur de recherche

M. CHINNIAH Yuvin, Ph. D, membre et codirecteur de recherche

M. TURCOT Denis, M. Sc. A., membre

DÉDICACE

Je dédie ce travail à :

- Ma chère mère, exemple d'amour et de persévérance, mon amour envers toi a guidé ma vie au point que je veux tout t'offrir pour répondre à tes sacrifices.
- L'âme de mon cher père.

- Mes sœurs et frère pour leur soutien continu durant ces longues années.

- À tous mes amis avec lesquels j'ai passé des moments inoubliables et partagé plein de souvenirs.

- À toute ma famille.

- À toutes les personnes qui m'ont aidé tout au long de mon parcours et qui ont été à mes côtés lorsque j'en avais besoin, je vous remercie du fond du cœur.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet par la disponibilité dont ils ont fait preuve à mon égard ; tout particulièrement :

- **M. Mohamed Salah Ouali et M.Chinniah Yuvin**, mes directeurs de recherche, pour leur soutien, leur confiance, et leur compréhension tout au long de mon parcours, et pour leurs conseils qui ont facilités mon intégration dès le début, et qui m'ont guidé tout au long du programme.
- **M. Barthelemy Aucourt, M.Damien Burlet-Vienney et Mme Sabrina Jocelyn**, pour leur disponibilité, leurs conseils et recommandations qui m'ont guidés lors du programme et aussi lors de ce projet, pour leur énergie qu'ils m'ont consacrée, et surtout pour leur professionnalisme et la confiance qu'ils m'ont accordée dès le début.
- **M. Bernard Clément**, mon professeur à Polytechnique, pour son cours en analyse de régression qui m'a permis de corriger ma perception de ce concept et de l'élargir, ce qui a facilité considérablement mon travail étant donné que j'avais déjà acquis les connaissances nécessaires pour le réaliser.
- **Mme. Suzanne GUINDON**, agente aux dossiers étudiants pour les programmes de maîtrise, pour sa disponibilité, son professionnalisme, sa compréhension, et la précision de ses réponses qui facilitent énormément les procédures administratives au sein du département.

Je remercie également tous les professeurs et le personnel du département des mathématiques et du génie industriel, pour leur accueil et leur coopération, témoins d'un grand professionnalisme.

RÉSUMÉ

Les machines mobiles sont massivement utilisées dans plusieurs secteurs économiques majeurs tels que la construction, l'exploitation forestière, l'exploitation minière et l'agriculture. Elles sont impliquées dans des accidents causant des dommages humains et matériels considérables aussi bien en utilisation normale que durant les opérations de maintenance.

L'objectif du présent travail est de déterminer les causes principales des accidents engendrés par les machines mobiles sur la base d'un échantillon de 309 accidents graves et mortels au Québec et d'estimer la probabilité ou la sévérité de ces accidents à l'aide de techniques statistiques et de fouille des données (data mining). Chaque rapport décrit chronologiquement et en détails toutes les circonstances entourant l'accident.

Deux méthodes d'analyse sont développées et appliquées. La première méthode est l'analyse manuelle de chaque rapport d'accident. Le but est d'extraire les données, sous forme de vecteur d'informations libellé par accident grave ou mortel et résumant les circonstances et les causes retenues pour cet accident. Les principales causes d'accidents sont déterminées sur la base de leurs récurrences dans l'échantillon et une liste de vérification des éléments importants à vérifier pour une utilisation sécuritaire des machines mobiles est proposée.

La seconde méthode est l'analyse quantitative de l'ensemble des vecteurs d'informations en faisant appel à des techniques statistiques et de fouille de données : modèles de régression logistique et de régression linéaire multiple, modèle d'analyse logique des données (LAD) et modèle de risque proportionnel de Cox. Chacun de ces modèles a permis d'estimer la probabilité et la sévérité d'un accident d'une façon différente. Les résultats de chaque modèle sont discutés.

ABSTRACT

In Quebec, mobile machinery is frequently used in several major economic sectors such as construction, forestry, mining and agriculture. They cause a considerable amount of human and material damage during exploitation as well as maintenance operations.

The study aims to determine the main causes of mobile equipment related accidents based on the analysis of 309 accidents reports in Quebec, and to estimate the probability and the severity of accidents using statistical methods and a data mining technique. Each report provides a detailed and chronological description of all circumstances surrounding the accident.

Two analysis methods are developed and applied. The first one consists of analysing manually all the accidents reports to extract the most significant information. The main causes are determined according to their frequencies in the studied sample, lastly a chek-list was elaborated to verify the most important points for a safe use of mobile equipment.

The second method consists of performing a quantitative analysis of mobile equipment related accidents. For this part, four statistical and data mining technics were applied: logistic regression, multiple linear regression, logical analysis of data (LAD) and proportional hazard model of Cox (PHM). Each model allows a different way to estimate the probability or the severity of accidents. The results of the models are discussed.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VI

TABLE DES MATIÈRES VII

LISTE DES TABLEAUX IX

LISTE DES FIGURES XI

LISTE DES ANNEXES XII

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE ET REVUE DE LITTÉRATURE 4

2.1 Équipement/machine mobile : définition 4

2.2 Quelques statistiques d'accidents 5

2.3 Problématique de recherche 6

2.4 Revue de la littérature sur les accidents liés au machines mobiles 7

2.5 Revue de la littérature sur les modèles quantitatifs 11

CHAPITRE 3 ANALYSE QUALITATIVE DES ACCIDENTS ENGENDRÉS PAR DES ÉQUIPEMENTS MOBILES 13

3.1 Méthode d'analyse 13

3.2 Analyse des résultats 15

3.2.1 Accidents liés à la maintenance des équipements mobiles 17

3.2.2 Accidents liés à l'exploitation des équipements mobiles 20

3.3 Causes retenues et risques spécifiques 23

3.4 Spécificités des machines mobiles 24

3.5 Actions de prévention....25
3.6 Conclusion de l'analyse qualitative....31
CHAPITRE 4 ANALYSE QUANTITATIVE DES ACCIDENTS ENGENDRÉS PAR DES ÉQUIPEMENTS MOBILES....32
4.1 Préambule....32
4.2 Formatage des données....32
4.3 Modèle de régression logistique....35
4.3.1 Codification des variables....36
4.3.2 Estimation des paramètres du modèle Logistique....39
4.3.3 Rapports des cotes (Odds Ratios)....40
4.3.4 Analyses et commentaires....41
4.4 Modèle de régression linéaire multiple....43
4.4.1 Modélisation de la variable de sortie....44
4.4.2 Résultats....45
4.5 Modèle d'Analyse logique des données....48
4.5.1 Préparation des données....49
4.5.2 Résultats....50
4.5.3 Interprétation des résultats....50
4.6 Modèle de risque proportionnel de Cox....53
4.6.1 Préparation des données....53
4.6.2 Analyse des résultats....54
4.7 Discussion de l'analyse quantitative....56
CHAPITRE 5 CONCLUSION....58
RÉFÉRENCES....60
ANNEXES....63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Nombre de lésions, jours indemnisés et montant de débours par genre d'accident entre 2004 et 2010 6

Tableau 3.1 : Nombres d'accidentés graves et mortels par année et par mois au Québec entre 2000 et 2013. 16

Tableau 3.2 : Nombre d'accidentés graves ou mortels liés à la maintenance type d'accident 19

Tableau 3.3 : Nombre d'accidents graves ou mortels liés à la maintenance des équipements en fonction de l'activité, du lieu et de la fonction du travailleur 20

Tableau 3.4 : Nombre d'accidentés graves ou mortels liés à l'exploitation des équipements mobiles par type d'accident 23

Tableau 3.5 : Liste des vérifications *(Check list)* pour une évaluation rapide de la sécurité des machines mobiles 29

Tableau 4.1 : Éléments MELITO 33

Tableau 4.2 : Nombre d'accidents par élément MELITO 34

Tableau 4.3 : Description des secteurs d'activité 37

Tableau 4.4 : Modalités de références pour chaque facteur 39

Tableau 4.5 : Valeurs estimées des paramètres du modèle Logit 39

Tableau 4.6 : Rapports de risque par rapport à la modalité de références 41

Tableau 4.7 : Résultats avec base de données complète sans données d'expérience 45

Tableau 4.8 : Valeurs estimées des paramètres du modèle de régression linaire avec la base de données complète sans données d'expérience 46

Tableau 4.9 : Résultats du test du modèle de régression avec base de données réduite avec données d'expérience 47

Tableau 4.10 : Estimation des paramètres du modèle de régression linéaire utilisant la base de données réduite avec données d'expérience. 47

Tableau 4.11 : Règles retenues de classification des accidents graves et mortels 50

Tableau 4.12 : Règles retenues de classification des accidents graves et mortels 52

Tableau 4.13 : La modalité de références pour chaque facteur.....53

Tableau 4.14 : Valeurs des rapports de risque ainsi que les valeurs estimées des paramètres du modèle de Cox.....54

Tableau A.1 Nombre de lésions, jours indemnisés et montants de débours par genre d'accident 63

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 : Variation du nombre des accidents en fonction des mois et des années au Québec entre 2000 et 2013 16

Figure 3.2 : Nombre d'accidentés graves ou mortels liés à la maintenance en fonction du secteur d'activité et du type d'équipements (Maintenance) 18

Figure 3.3 : Nombre d'accidentés graves ou mortels liés à l'exploitation en fonction du secteur d'activité et du type d'équipements (Exploitation) 22

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A – NOMBRE DE LÉSIONS, JOURS INDEMNISÉS ET MONTANT DE DÉBOURS PAR GENRE D'ACCIDENT 63

ANNEXE B - LE P-PLOT DES RÉSIDUS POUR LE MODÈLE DE REGRESSION LINIAIRE MULTIPLE 67

ANNEXE C – LES GRAPHES DE TEST DE SCHŐNEFELD 68

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La santé et la sécurité au travail (SST), jadis un fardeau pour l'entreprise, est aujourd'hui un élément essentiel de son excellence opérationnelle. Son intérêt n'a cessé d'augmenter, aussi bien chez les chercheurs que chez les ingénieurs. Les bénéfices aux niveaux de la santé, la sécurité et l'intégrité physique des travailleurs sont considérables. La réduction des pertes économiques et sociales subies par les travailleurs, les entreprises et les systèmes de santé des pays sont importantes (FACTS, 2008).

La réduction du risque ou même l'élimination des phénomènes dangereux à la source doivent figurer parmi les priorités principales de toute organisation. Dans un milieu de travail, les employés sont fréquemment exposés à un ou plusieurs types de risques liés à la santé et la sécurité tels que les risques (CNESST, 2011) :

- Chimiques ou dangers d'ordre chimique;
- Physiques ou dangers d'ordre physique;
- Biologiques ou dangers d'ordre biologique;
- Ergonomiques ou dangers d'ordre ergonomique;
- Psychosociaux ou dangers d'ordre psychosocial;
- Liés à la sécurité ou danger pour la sécurité.

Pour chacun de ces risques, la commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) a décrit des formes sous lesquelles chaque risque se manifeste ainsi que ses conséquences.

Le dernier type de risques est particulièrement intéressant parce qu'il concerne directement les machines qualifiées de « dangereuses ». Ces machines peuvent présenter plusieurs phénomènes dangereux à la fois. De plus, vu l'incontournable contact des travailleurs avec ces machines, beaucoup de situations et évènements dangereux y sont liés. Ce qui explique le grand nombre de travaux dédiés à l'étude de la sécurité des machines industrielles de façon générale. Toutefois, les études se rapportant aux machines/équipements mobiles restent relativement limitées, et ce malgré leur omniprésence dans la majorité des secteurs économiques ainsi que le nombre et la gravité considérable des accidents que causent ce type d'équipements.

Les équipements mobiles sont présents dans la quasi-totalité des secteurs d'activités économiques (ex. manufacturier, construction, mines, agriculture, exploitation forestière). Leur exploitation aussi bien que leur maintenance expose les travailleurs à des phénomènes dangereux principalement : mécanique, électrique, hydraulique, gravitationnel, thermique et chimique. Les conséquences d'un accident peuvent être graves ou mortelles à la fois pour les personnes qui opèrent ces équipements et celles qui se trouvent à proximité dans le cadre de leur travail (McCann, 2006). La sécurité de ces équipements dans les différentes phases de leur cycle de vie est donc primordiale.

Plusieurs études se sont intéressées aux équipements mobiles par type d'équipement ou par secteur d'activité tels que la construction, les mines, l'agriculture ou le transport. Cependant, très peu d'études se sont intéressées aux équipements mobiles qui nécessitent une attention particulière basée sur leur mobilité comme caractère distinctif principal des autres types d'équipements.

Au Québec, aucune étude traitant les accidents engendrés par les machines mobiles n'a été réalisée comparativement aux autres provinces du Canada. Le nombre et la gravité des accidents engendrés par les équipements mobiles et l'absence d'études antérieures s'intéressant à la sécurité de ce type d'équipements au Québec justifient l'importance du présent projet de recherche. Les objectifs poursuivis visent à :

- Déterminer les causes principales qui mènent à la survenue des accidents liés aux machines mobiles, en distinguant les accidents en exploitation des accidents en maintenance ;
- Élaborer des recommandations suite aux analyses faites pour réduire ou éliminer les risques de survenue de ces accidents ;
- Tester un ensemble de techniques statistiques et de fouille de données afin de prédire et quantifier le risque d'accident en fonction de certains facteurs.

Plus particulièrement, l'étude proposée est divisée en deux parties. La première partie consiste en l'analyse manuelle des rapports d'accidents graves et mortels liés aux équipements mobiles produits par les inspecteurs de la CNESST entre 2000 et 2013 au Québec. Cette analyse permet de déterminer les causes principales des accidents et de proposer des mesures de préventions pouvant réduire ou éliminer le risque. La deuxième partie consiste en l'utilisation et la transformation d'une partie des données extraites de la première partie pour prédire et quantifier le risque d'accident (probabilité et gravité du dommage).

Pour la seconde partie quatre techniques ont été utilisées. Pour chaque technique, des objectifs et des méthodes différentes ont été suivis et envisagés :

1- Régression logistique. La raison pour laquelle ce modèle a été choisi est principalement le degré de sévérité des accidents. Dans les rapports d'accident, deux degrés de sévérité sont observés, soit accident grave non mortel, soit accident mortel. L'objectif est de prédire le degré de sévérité de l'accident en fonction des facteurs d'entrées et le calcul des rapports de risque rapproché (*odds ratio*) pour des combinaisons de facteurs différentes.

2- Régression linéaire multiple. Le besoin d'attribuer une mesure quantitative, pour comparer différents accidents, a nécessité la transformation des causes d'accidents (variables catégorielles) en variables ordinales continues. Le modèle de régression linaire multiple a permis de prédire cette valeur.

3- Analyse logique des données (LAD). Cette technique est utilisée pour les deux raisons suivantes : (1) contourner les contraintes imposées par les modèles de régression et découvrir les combinaisons des facteurs qui mènent à des accidents graves ou mortels ; et (2) tirer profit de l'efficacité de cette méthode par rapport aux autres méthodes de classification.

4- Risque proportionnel de Cox. L'exploitation et l'utilisation de l'expérience des victimes au moment de l'accident comme donnée de survie afin de pouvoir prédire le taux de défaillance de base et le rapport des risques pour différentes combinaisons de facteurs.

Le présent mémoire comporte quatre chapitres. Le deuxième chapitre présente une clarification de la problématique ainsi qu'une revue de littérature visant à évaluer la perception du problème des accidents engendrés par les machines mobiles au Canada et dans le reste du monde. Ce chapitre permet de comprendre les méthodologies proposées pour étudier ce type de problème. Le troisième chapitre présente la méthodologie de l'analyse manuelle des rapports d'accidents produits par les inspecteurs de la CNESST et la discussion des résultats obtenus. La dernière partie de ce chapitre propose des mesures de prévention des accidents et de vérification de sécurité des machines mobiles sous forme d'une liste de vérification. Dans le quatrième chapitre, les quatre techniques d'analyse quantitative sont présentées ainsi que les résultats obtenus. Ce chapitre contient des propositions pour améliorer les résultats de chaque technique. Le cinquième chapitre présente la conclusion générale, les recommandations et les travaux futurs.

CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE ET REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Équipement/machine mobile : définition

Selon la norme ISO 12100-2010 (sécurité des machines, principes généraux de conception, appréciation et réduction de risque) « *Une machine est un ensemble équipé ou destiné à être équipé d'un système d'entraînement, composé de pièces ou d'organes liés entre eux dont au moins un est mobile et qui sont réunis de façon solidaire en vue d'une application définie* ». Cette norme ne donne pas de définition spécifique pour les machines mobiles.

Selon le journal officiel de l'Union européenne, une machine présentant des dangers dus à sa mobilité est définie comme étant une machine dont le fonctionnement exige, soit la mobilité pendant le travail, soit un déplacement continu ou semi-continu suivant une succession de postes de travail fixes. Ou une machine qui fonctionne sans déplacement, mais qui peut être munie de moyens permettant de la déplacer plus facilement d'un endroit à un autre. L'opérateur chargé du déplacement de la machine peut, soit être transporté par la machine, soit accompagner la machine à pied, soit la guider par commande à distance (Journal officiel de l'union européenne, 2006).

La norme CSA Z-460 (maitrise des énergies dangereuse - cadenassage et autres méthodes) ne présente pas de définition des machines mobiles. Mais nous y trouvons plusieurs exemples tels que : chargeuses frontales, tracteurs sur pneumatiques, pelles rétro-caveuses, excavatrices, débusqueuses, porteurs, moissonneuses d'arbres, grattes à gravier, compacteurs, rouleaux, niveleuses, tracteurs agricoles et chariots tracteurs de manutention, chariots élévateurs, chariots élévateurs à fourche à conducteur à pied, véhicules de transport, véhicules autonomes (sans opérateur), engins de levage mobiles automoteurs, brunissoirs et récureuses automatiques, aéronefs, matériel roulant, grues mobiles et navires. Cette variété d'équipements montre la diversité des risques auxquels les travailleurs sont confrontés.

Au Québec, le règlement de la santé et la sécurité du travail (Art. 1) donne la définition suivante : « *Une machine mobile ou un véhicule automoteur est tout véhicule à moteur monté sur roues, sur chenilles ou sur rails servant à transporter des objets ou des matériaux, ou à tirer ou pousser des remorques ou des matériaux, à l'exception d'un véhicule tout terrain et d'un appareil de levage.* » (RSST, 2014).

De manière générale, les équipements mobiles sont définis dans cette étude comme des machines ou équipements autopropulsés, remorqués ou transportés qui ne sont pas prévus uniquement pour le transport de personnel (sont exclus les équipements fixes et les outils portatifs). Cela inclut, par exemple, les chargeuses, les chariots élévateurs, les souffleuses à neige, les déneigeuses, les camions-bennes, les grues mobiles, les tracteurs, les nacelles, les épandeurs d'abrasif, les surfaceuses, etc. Comme nous pouvons le constater dans cette liste, de plusieurs de ces équipements mobiles sont utilisés l'hiver au Québec et au Canada pour entretenir la voirie.

2.2 Quelques statistiques d'accidents

Pour avoir une idée plus claire de la gravité des dommages humains et matériels qui pourraient être causés par les machines mobiles, un premier travail a été réalisé par l'IRSST dans le cadre d'une activité de recherche (Activité 2013-0082, 2014). Ce travail montre clairement l'importance de prioriser les accidents en lien avec les machines mobiles au Québec. La moyenne annuelle du nombre des lésions avec perte de temps indemnisée est de 273 lésions entre 2004 et 2010 pour un total annuel de 26 411 jours indemnisés et 2,8 millions de dollars de débours à la CNESST. Le tableau 2.1 présente un extrait des statistiques des accidents classées par ordre décroissant d'importance. L'Annexe A présente les statistiques complètes.

Il en ressort clairement que les camions et les chariots élévateurs à fourche causent la majorité des lésions avec perte de temps indemnisée au Québec. Les deux études prévues dans ce mémoire chercheront à exploiter l'information disponible dans les rapports d'accidents consignés par les inspecteurs de la CNESST afin d'analyser les causes de ces accidents et de fournir des modèles de prédiction du risque pour ces équipements mobiles.

Tableau 2.1 : Nombre de lésions, jours indemnisés et montant de débours par genre d'accident entre 2004 et 2010

Genre d'accident ou d'exposition (code et description)	Lésions		Jours indemnisés		Débours totaux ($)	
	N	%	N	%	N	%
82500 - Camion,	237	12,4	25 710,2	13,9	2 733 777	13,9
85100 - Chariot élévateur à fourche,	192	10,1	13 965,2	7,6	1 475 433	7,5
85200 - Chariot industriel mécanique,	48	2,5	3 244,4	1,8	350 802	1,8
85900 - Véhicule mécanique d'usine ou industriel,	41	2,2	3 869,2	2,1	502 589	2,6
85300 – Tracteur	31	1,6	3 683,4	2,0	395 950	2,0
84100 - Véhicule tout terrain (vtt)	31	1,6	4 830,4	2,6	513 223	2,6
85290 - Chariot industriel mécanique,	28	1,5	1 885,4	1,0	189 424	1,0
84300 – Motoneige	26	1,4	1 972,7	1,1	190 297	1,0
32130 - Pelles à vapeur & pelles mécaniques	23	1,2	3 989,7	2,2	474 717	2,4
32540 - Rouleaux compresseurs, finisseurs	18	1,0	1 485,5	0,8	166 066	0,8
85210 - Porte-conteneurs	16	0,8	2 193,6	1,2	192 121	1,0
32110 - Chargeuses-pelleteuses	14	0,7	1 425,8	0,8	167 513	0,9
32430 - Machines à creuser les galeries, les tunnels	13	0,7	4 878,1	2,6	569 310	2,9
39940 – Souffleuses	13	0,7	623,8	0,3	62 702	0,3

2.3 Problématique de recherche

La présence des équipements mobiles dans la plupart des secteurs d'activités augmente considérablement le risque d'accident impliquant ce type d'équipements. La problématique de l'étude concerne l'analyse et la prévention des accidents graves et mortels engendrés par des équipements mobiles tant lors des opérations de maintenance qu'en exploitation. Cette problématique se base sur 306 rapports d'enquête d'accidents graves ou mortels au Québec entre 2000 et 2013 en lien avec les équipements mobiles. Plusieurs problèmes en découlent tels que :

- L'identification des types d'accident et d'équipements les plus à risque lors des opérations de maintenance ou en opération ainsi que leurs spécifications par rapport à celles des machines fixes ;

- Le recensement des causes explicatives telles la gestion déficiente de la prévention, le manque de formation, des lacunes au niveau de la supervision, des procédures de travail manquantes ou non sécuritaires et la maintenance déficiente de ces équipements ;
- Les moyens de prévention adéquats à mettre en place pour les équipements mobiles lors des activités de maintenance ou encore des techniques pour la prévention des collisions engins-piétons.

Le besoin d'une compréhension plus profonde des facteurs influents sur la santé et la sécurité en milieu de travail nécessite le recours à des méthodes de modélisation et de prédiction quantitatives. Il s'agit d'un volet important de l'étude proposée puisque le défi réside dans l'exploration de données disparates et très diversifiées extraites des rapports textuels d'accidents à l'aide des techniques statistiques et non statistiques disponibles. Les problèmes adressés dans ce volet quantitatif sont principalement liés à/au :

- Formatage des informations et la codification des facteurs afin d'avoir une base de données pouvant être utilisée par des méthodes quantitatives ;
- La quantification du risque et du dommage lié à l'exploitation des équipements mobiles ;
- La validation des modèles par des mesures statistiques.

2.4 Revue de la littérature sur les accidents liés au machines mobiles

Aux États-Unis, une étude sur l'évolution du nombre de décès causés par les machines entre 1992 et 2010 a démontré une diminution des décès causés par les machines fixes de 3,5% en moyenne par année. Pour les machines mobiles, sur cette période, la diminution est moindre et s'établit à 2,6% en moyenne par année. Les auteurs mentionnent que les risques associés aux tracteurs, aux excavatrices et autres machines mobiles doivent continuer d'être une préoccupation pour les préventionnistes (Marsh SM, 2015).

Entre 1992 et 2007, les tombereaux ont causé 829 accidents mortels parmi lesquels 336 accidentés sont des opérateurs et 343 sont des piétons travaillant à proximité. La plupart des piétons ont été frappés ou écrasés. 64 travailleurs sont décédés durant des opérations de maintenance, dont 22 après avoir été frappés ou écrasés par une partie mobile du véhicule. L'analyse des accidents causés par ce type d'équipements démontre que les ceintures de sécurité, des moyens de détection de la

présence de piétons dans les angles morts et des signaux pour avertir les piétons, surtout lors des manœuvres de recul sont requis pour réduire le risque d'accident (McCann, 2011).

Entre 1997 et 2003, 88% des accidents liés aux grues ont été causés par des grues mobiles. De manière générale, les accidents les plus fréquents pour les grues sont des écrasements par des charges (32%), des électrocutions (27%), des écrasements lors de l'assemblage ou le désassemblage (21%), des défaillances de la flèche ou du câble de levage (12%), des basculements de la grue (11%), des heurts avec le contrepoids de la grue (3%) et des chutes (2%). Par ailleurs, l'opérateur n'avait pas de licence dans plus de 90% des cas où l'opérateur est l'accidenté. 10% des opérateurs accidentés avaient plus de 15 ans d'expérience, ce qui montre l'impact de la formation et de l'expérience sur le risque d'accident avec ce type d'équipement (Beavers, 2006).

Selon (McCann, 2006), un contact avec un équipement lourd ou des véhicules représente la 3^{e} cause de décès sur les sites d'excavation en construction. Au total, 481 accidents mortels ont été reportés entre 1992 et 2002 sur des sites d'excavation. Parmi ces accidents mortels, 253 accidents (53%) sont liés aux véhicules et aux équipements lourds. 134 accidents sont engendrés par des véhicules en mouvement sur les sites, 60 accidents par un objet de l'équipement en mouvement, 31 sont des coincements et 26 accidents des accidents divers (ex. chute, électrocution, explosion). Parmi les 253 victimes, 132 (52%) sont des opérateurs, 82 (32%) des travailleurs piétons, 34 (14%) des travailleurs effectuant des interventions de maintenance et 5 (2%) des travailleurs œuvrant dans ou sur l'équipement, mais ne l'opérant pas. Parmi les 132 opérateurs décédés, 20 (15%) travaillaient à l'extérieur, mais proche de leur véhicule. Parmi 57 renversements d'équipement, 21 décès sont dus à l'état du sol et dans 16 cas, l'accident est survenu lors du chargement ou déchargement de l'équipement. Dans 13 cas, l'opérateur ne mettait pas de ceinture de sécurité ce qui a provoqué son éjection. Parmi les 82 travailleurs piétons, 42 ont été frappés ou heurtés par l'équipement et 34 frappés par une partie de l'équipement. Pour les accidents durant les activités de maintenance, les évènements suivant se sont produits : 21 cas de défaillance des freins, 5 cas de démarrage de l'équipement par une tierce personne quand la victime était en train de le réparer et 5 cas d'explosion de pneu.

Aux États-Unis, 2144 décès ont été enregistrés entre 1980 et 1992 en relation avec des équipements mobiles dans le secteur de la construction avec un taux de mortalité annuel de 2,3 par 10^{5} travailleurs (Ore, 1997). Le risque qu'un travailleur soit tué par un véhicule ou un équipement mobile dans ce secteur est deux fois plus grand que dans les autres secteurs. Malgré les efforts et

les actions de prévention, l'écart entre les résultats et les objectifs attendus reste important, avec un taux de mortalité diminué de seulement 11% en 13 ans en comparaison aux chutes (43%), aux électrocutions (54%) et aux accidents engendrés par les autres types de machines (48%). Selon la même étude, la majorité des victimes de ce type d'accidents sont les travailleurs piétons (40%) suivis par les opérateurs (30%) et les passagers (9%).

Dans le secteur des mines, les accidents liés aux chargeuses ainsi qu'aux véhicules sont plus graves et plus nombreux que les autres types d'accidents (Kecojevic, 2004). Entre 1995 et 2002, dans ce secteur, 121 accidents mortels concernant ces équipements ont été reportés. Les chargeuses sont impliquées dans 32 accidents mortels et les camions dans 89 cas. Les types d'accidents en lien avec les chargeuses sont des renversements (41%), des collisions avec des piétons (34%) et des accidents pendant la maintenance (13%). Les causes de ces accidents sont notamment les défaillances de composants mécaniques (28%), une procédure de maintenance inadéquate (28%) et mauvaise adaptation aux conditions climatiques (17%). Pour les autres véhicules, les principaux types d'accidents sont les renversements (47%), les collisions avec piétons (28%) et les collisions avec un autre véhicule (11%). Les causes d'accidents sont la défaillance de composants mécaniques (22%), le signal d'avertissement négligé (20%), la formation insuffisante (10%) et une procédure de maintenance inadéquate (7%).

Entre 1980 et 1989, les chariots élévateurs ont été particulièrement impliqués dans les accidents engendrés par des machines. Seuls les tracteurs agricoles ont été à l'origine de plus d'accidents mortels en milieu de travail (Pratt, 1996). Entre 1980 et 1994, toujours aux États-Unis, les chariots élévateurs ont causé 1021 décès en milieu de travail (Collins, 1996). Ces accidents sont là encore typiques pour des équipements mobiles : renversement du chariot élévateur (22%), heurt ou écrasement d'un piéton (respectivement 20% et 16%). Toutefois, certains accidents sont propres aux chariots élévateurs : chute d'un travailleur alors qu'il a été soulevé par le chariot élévateur, chute du chariot sur l'accidenté lors de la maintenance, chute de la charge sur l'accidenté, renversement et chute du chariot depuis un quai de chargement, et collision entre un chariot élévateur et un autre véhicule.

Enfin, entre 1991 et 1992, chaque semaine, il y a eu en moyenne 2 décès et 700 accidents graves causés par les chariots élévateurs aux États-Unis (Helmer, 1994). Par ailleurs, une étude menée dans 8 usines du secteur de l'industrie automobile entre 1992 et 1995 concernant les accidents reliés aux chariots élévateurs et aux autres véhicules industriels pour la manutention a démontré

que dans 22% des accidents liés à ces équipements étaient dus à une collision avec un obstacle permanent ou temporaire et 17% à une collision avec un autre véhicule. L'étude a aussi démontré que la chance d'avoir une collision (i) augmente de 1,89 lors de la présence d'un obstacle qui réduit la largeur des allées, (ii) diminue d'un tiers si des miroirs ont été installés dans les intersections et les endroits avec visibilité réduite, et (iii) augmente de 1,58 si le chariot chargé plutôt qu'à vide. Cela prouve l'importance de l'aménagement du lieu de travail et la planification d'opérations de manutention pour prévenir les accidents liés aux chariots élévateurs (Collins et Smith, 1999).

En Australie, entre 1989 et 1992, une étude a permis d'analyser les accidents mortels dans le secteur de l'agriculture. Il en ressort que le taux de mortalité dans ce secteur d'activité y est quatre fois supérieur aux autres secteurs. Les équipements tels que les véhicules ou les machines agricoles mobiles, notamment les tracteurs, sont parmi les équipements les plus impliqués. Selon (Franklin, 2001), les activités de maintenance sont particulièrement à risque. Des questionnements concernant l'utilisation considérable des équipements mobiles dans ce secteur, la structure d'une entreprise agricole et la disponibilité du personnel qualifié pour la prise en charge des travaux de maintenance ont été soulevés.

En Suède, entre 1988 et 1997, également dans le secteur agricole, les tracteurs ont été directement ou indirectement impliqués dans 36,4% des accidents mortels sur la période d'étude (Thelin, 2002).

En Inde, dans les mines à ciel ouvert, les équipements mobiles ont causé plus de 59% des décès. Parmi les principales causes d'accidents, nous citons : le renversement d'équipement, l'état des chemins, la maintenance inadéquate ou improvisée, l'erreur humaine, la défaillance de la machine ou d'un composant de la machine, la visibilité déficiente, la surcharge de l'équipement et la conception. L'opérateur est en cause dans 60% des accidents impliquant une chargeuse, 45% de ceux impliquant une excavatrice, 45% de ceux impliquant un bulldozer et 38% des accidents impliquant un tombereau. La proportion des accidents causés par l'erreur humaine dépasse les 50% en moyenne, ce qui ramène en avant plan les questions de formation et de respect des procédures de travail pour les équipements mobiles (Kumar, 2014).

Au Canada, entre 1990 et 2005, 1766 accidents mortels ont été reportés dans le secteur de l'agriculture. 360 (20,4%) ont été dus au renversement de l'équipement agricole avec 221 (61,4%) renversements sur le côté et 107 (29,7%) capotages arrière (Degroot, 2011). Toujours dans ce secteur, entre 1990 et 2008, les 5 premières causes d'accidents mortels ont été : les écrasements

(20%), les reversements ou basculements des machines (18%), les étranglements (8%), les collisions entre équipements mobiles (7%) et les collisions avec un piéton (7%) (CAIR, 2011). En Ontario, entre 1985 et 1993, toujours dans le secteur agricole, les accidents impliquant un tracteur ont été à l'origine de la plus grande proportion des coûts d'hospitalisation (34,4%), le coût moyen le plus élevé (3 065$) et la durée moyenne d'invalidité la plus longue (5 jours) (Hartling, 1997).

En Ontario, entre 1990 et 1995, 6000 accidents liés aux chariots élévateurs ont été enregistrés (Swartz, 1998). Les opérateurs ont été impliqués dans 60% des cas. 17 d'entre eux ont trouvé la mort et 143 ont été grièvement blessés. Les causes énoncées sont : les collisions, les chutes, les expositions au monoxyde de carbone, le basculement ou renversement du chariot et les explosions.

2.5 Revue de la littérature sur les modèles quantitatifs

Les modèles quantitatifs ont fait l'objet de moins de publications scientifiques dans le secteur des machines mobiles. Nous pouvons citer les travaux de Cheng et Ching-Wu (2010) qui ont utilisé les règles d'association pour explorer les relations cause-à-effet dans le domaine de la construction à Taiwan entre 2000 et 2007 en analysant 1347 accidents, classifiés selon 12 facteurs. Ils ont trouvé que les accidents ont plus de probabilité de survenir lorsque certaines combinaisons de modalités de facteurs sont présentes telles que (i) travail en hauteurs sans mesures de protection (ii) perte d'équilibre en mouvement (iii) mauvais usage des équipements de protection,(iv) manque d'expérience et (v) le contact avec des structures instables. De plus, ces accidents sont plus spécifiques aux petites entreprises.

Une autre étude d'industrie de construction à Taïwan, la CART (classification and regression tree) a été employée pour identifier les relations cause effet des accidents entre 2000 et 2009 à propos de 1542 accidents. Les chercheurs ont trouvé que les règles d'occurrence des chutes d'objet ou de personne sont les plus significatives pour prédire les accidents dans l'industrie de construction (Cheng et al, 2012).

Pour comprendre la relation entre la distraction et les accidents mortels au Maryland et Washington DC entre 2000 et 2003 reliés aux véhicules automoteurs, Wen-Shuan Tseng et al. (2005) ont utilisé les réseaux de kohonen pour le regroupement (clustering). Par la suite, ils ont exploré les règles par les arbres de décision et les réseaux de neurones. Ils ont trouvé que lorsque l'inattention est associée

avec des problèmes physiques ou mentaux, la tendance d'être impliquée dans un accident avec un objet statique est plus élevée.

Pour étudier les accidents impliquant des machines aux États-Unis entre 1992 et 2010, Marsh et al. (2015) ont utilisé une régression de Poisson pour évaluer la tendance de ces accidents. Ils ont trouvé que la moyenne annuelle décroit de 2,8% pour les machines en général, 2,5% pour les machines mobiles et 3,5% pour les machines fixes. Ils déduisent que les travailleurs âgés, les travailleurs autonomes, les travailleurs des secteurs agriculture/foresterie/pèche, construction et du secteur minier sont les plus à risque.

CHAPITRE 3 ANALYSE QUALITATIVE DES ACCIDENTS ENGENDRÉS PAR DES ÉQUIPEMENTS MOBILES

3.1 Méthode d'analyse

L'objectif du présent chapitre est de déterminer les principales causes des accidents engendrés par des machines mobiles au Québec tant lors des opérations de maintenance qu'en exploitation. Une meilleure compréhension de ces causes peut mener à des actions préventives plus efficaces. Il s'agit d'une étude inédite sur les équipements mobiles au Québec.

Pour répondre à cet objectif, la base de données de la CNESST, qui assure 85 % des travailleurs actifs au Québec, a été consultée afin de compiler les rapports d'accidents de travail graves et mortels en lien avec les équipements mobiles au Québec entre 2000 et 2013 (CNESST, 2015). Ces rapports sont rendus publics dans le but de prévenir la répétition d'accidents semblables.

L'originalité de cette étude consiste dans le fait que tous les rapports d'enquête pour des accidents graves et mortels ayant eu lieu sur la période ciblée ont été exhaustivement consultés (813 rapports). Il n'y a pas eu de sélection de rapports par mots-clés. Les rapports d'enquête sont standardisés. Ils ont une structure semblable comprenant les éléments suivants :

- Le nom de l'entreprise ou de l'organisme au sein duquel l'accident est survenu ;
- La date de l'occurrence de l'accident ;
- Les noms des inspecteurs ;
- Le dommage de l'accident (grave ou mortel) ;
- Un résumé du fait accidentel et les conséquences ;
- Une abrégée des causes retenues par les inspecteurs ;
- L'organisation générale de l'entreprise ainsi que l'organisation de la SST ;
- La description chronologique détaillée de l'accident ;
- Le détail des causes retenues probables et non retenues ;
- Les mesures correctives et parfois des recommandations ;
- Des annexes contenant des informations sur l'accidenté ;

- Des photos du lieu de l'accident et de l'équipement en cause, des schémas ;
- Des rapports d'expertise externes en cas de besoin.

Afin d'avoir un dénominateur commun pour l'analyse des rapports d'enquête, un tableau de compilation a été élaboré à l'aide d'un fichier Excel©. Chaque ligne de ce tableau contient :

- La cote du rapport, l'année et le mois de l'occurrence de l'accident ;
- Le secteur dans lequel l'entreprise œuvre,
- L'équipement en cause ;
- Une brève description de l'accident ;
- L'abrégé des causes retenues par les inspecteurs ;
- Le type d'accident ;
- L'énergie en cause lors de l'accident ;
- L'emplacement de l'accident ;
- Le nombre des décès, de blessés ;
- L'occupation et l'expérience des accidentés.

Parmi les 813 rapports d'enquête d'accidents graves et mortels consultés couvrant la période de 2000 à 2013, 306 (38%) impliquant des équipements mobiles ont été retenus. Le concept d'équipement mobile décrit en début d'article a été utilisé à cette étape. De ces rapports, 219 (72%) concernent des accidents survenus lors de l'exploitation (236 accidentés), 62 (20%) concernent des accidents survenus lors de la réalisation de travaux de maintenance et d'activités connexes (69 accidentés) et 25 (8%) rapports concernent des accidents de la route « commun ». Cette séparation a été effectuée pour proposer *in fine* des solutions plus spécifiques pour chaque phase de vie de l'équipement.

L'analyse des 25 rapports d'enquête sur des accidents de la route n'a toutefois pas été poussée, ce thème faisant l'objet de recherches spécifiques. À noter que les causes principales pour ces accidents ont tout de même été répertoriées : (i) non-respect du code de la sécurité routière (ex. signalisation, ceinture de sécurité, vitesse excessive), (ii) hypovigilance et fatigue, et (iii) problèmes de perte de contrôle, mauvaise conduite.

Enfin, pour délimiter les cas litigieux en ce qui concerne les phases de maintenance ou d'exploitation, les éléments suivants ont été considérés :

- Les activités d'exploitation de l'équipement mobile ont inclus des activités spécifiques comme le démarrage normal, le stationnement, le déchargement/chargement, l'attelage et l'arrimage/désarrimage ;
- Les activités de maintenance de l'équipement mobile ont inclus les des activités comme l'inspection, la réparation, le déblocage, le nettoyage, le changement/gestion des pneus, le changement ou l'installation d'accessoires.

3.2 Analyse des résultats

Le tableau 3.1 présente le nombre d'accidentés (graves et décès) engendrés par des équipements mobiles par année entre 2000 et 2013 pour les phases d'exploitation et de maintenance (accidents routiers traditionnels exclus). En résumé, il y a eu en moyenne annuellement au Québec sur la période d'étude :

- 4,9 accidentés (graves et décès) pour 4 décès en lien avec la maintenance/réparation/déblocage des équipements mobiles ;
- 16,6 accidentés (graves et décès) pour plus de 14 décès en lien avec l'exploitation des équipements mobiles ;
- Le nombre moyen d'accidents par années a considérablement diminué après 2005, cette année coïncide avec la mise en place du plan d'Action (sécurité des machines) par la CNESST.

La figure 1 représente la variation du nombre d'accidents en fonction des mois et des années. Nous constatons l'absence de phénomènes particuliers pour les années (graphe de droite) telles qu'une tendance ou d'une périodicité.

Pour les mois, nous constatons une tendance à la hausse pour les mois d'été.

Dans la suite de chapitre, les résultats sont présentés en deux parties : l'analyse des accidents liés à la maintenance puis ceux liés à l'exploitation. Les décomptes sont présentés par type d'équipement, secteurs d'activité, type d'accidents et selon l'expérience des travailleurs. Ces tableaux expriment le nombre d'accidentés graves et décès.

Tableau 3.1 : Nombres d'accidentés graves et mortels par année et par mois au Québec entre 2000 et 2013.

Année	Maintenance	Exploitation	Total
2000	3	13	16
2001	4	20	24
2002	2	17	19
2003	10	22	32
2004	15	16	31
2005	5	25	30
2006	1	14	15
2007	5	21	26
2008	3	14	17
2009	7	15	22
2010	5	12	17
2011	4	13	17
2012	2	20	22
2013	3	14	17

Mois	Maintenance	Exploitation	Total
Janvier	7	14	21
Février	5	12	17
Mars	9	17	26
Avril	1	14	15
Mai	8	20	28
Juin	4	26	30
Juillet	8	21	29
Août	5	21	26
Septembre	8	23	31
Octobre	6	20	26
Novembre	4	33	37
Décembre	4	15	19

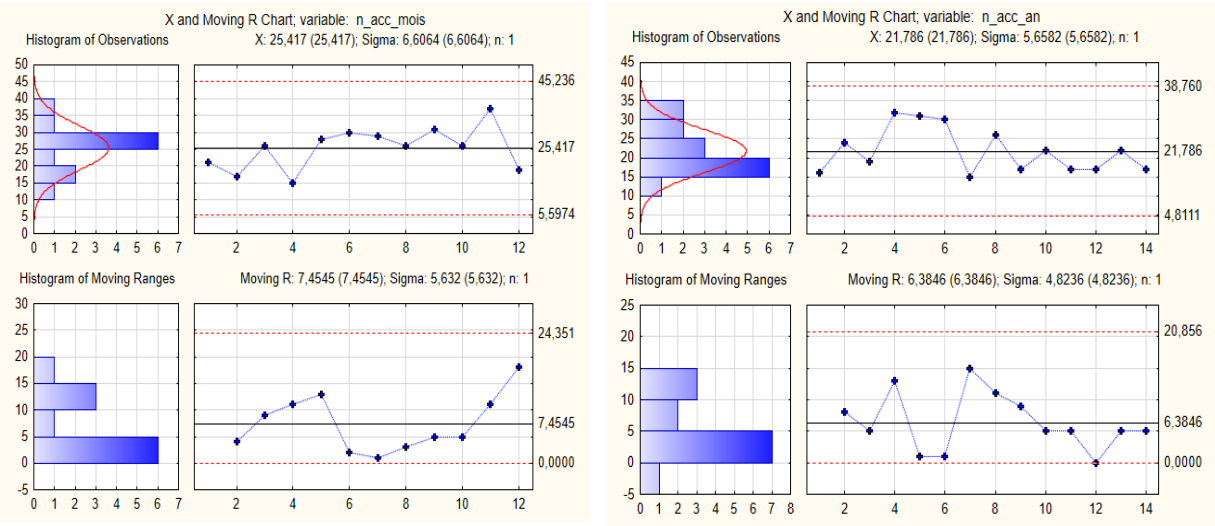


Figure 3.1 : Variation du nombre des accidents en fonction des mois et des années au Québec entre 2000 et 2013

3.2.1 Accidents liés à la maintenance des équipements mobiles

Les accidents durant des interventions de maintenance ou activités connexes ont fait l'objet de 62 rapports pour 69 personnes accidentées (56 décès et 13 blessés graves).

Année et mois

Selon le tableau 3.1, l'année 2004 a été la plus meurtrière avec 9 décès alors qu'il n'y a eu qu'un accident non mortel en 2006. Aucune tendance forte ne se démarque sur la période observée. Toutefois, les processus accidentels ne conduisent pas à des décès multiples. Selon le mois de survenance, les saisons d'été et d'hiver sont les périodes où il y a eu le plus d'accidents graves ou mortels. Une hypothèse pour expliquer ces variations saisonnières pourrait être le taux d'utilisation des équipements mobiles variable au courant d'une année.

Secteurs d'activité et type d'équipements

La figure 3.2 présente le nombre d'accidentés (graves et décès) liés à la maintenance des équipements mobiles au Québec sur la période 2000-2013 en fonction du secteur d'activité et du type d'équipements. Nous pouvons noter que le secteur d'activité « autres services personnels et commerciaux » est le secteur le plus touché. Cela peut être lié au fait que la majorité des entreprises de ce secteur sont des petites ou moyennes entreprises ou bien des propriétaires de véhicules. Par ailleurs, les équipements utilisés pour le transport routier (camions) sont les plus impliqués dans des accidents pendant les travaux de maintenance. À noter qu'une multitude d'équipements sont impliqués dans ce type d'accident. Nous les retrouvons sous la catégorie « autres » (occurrence < 2).

Type d'accident

Le tableau 3.2 fournit le nombre d'accidentés (graves et décès) liés à la maintenance des équipements mobiles au Québec sur la période 2000-2013 selon le type d'accident. Les accidents ont été classés selon 6 catégories. Les 3 catégories les plus représentées sont (i) la chute d'un équipement en élévation/en hauteur, (ii) une pièce en mouvement et (iii) un véhicule en mouvement. Des exemples d'accident sont fournis.

L'analyse plus approfondie des accidents permet de noter que le type « Chute d'un équipement en élévation/en hauteur » a une cause à tendance technique (ex. résistance du calage), alors que les accidents de « Véhicule en mouvement » sont souvent dus à un problème organisationnel et de communication. Enfin, les équipements agricoles semblent particulièrement concernés par les problèmes de partie d'équipement en mouvement, en l'occurrence la prise de force (PTO). Il n'y a pas de véritable tendance pour les autres secteurs d'activité.

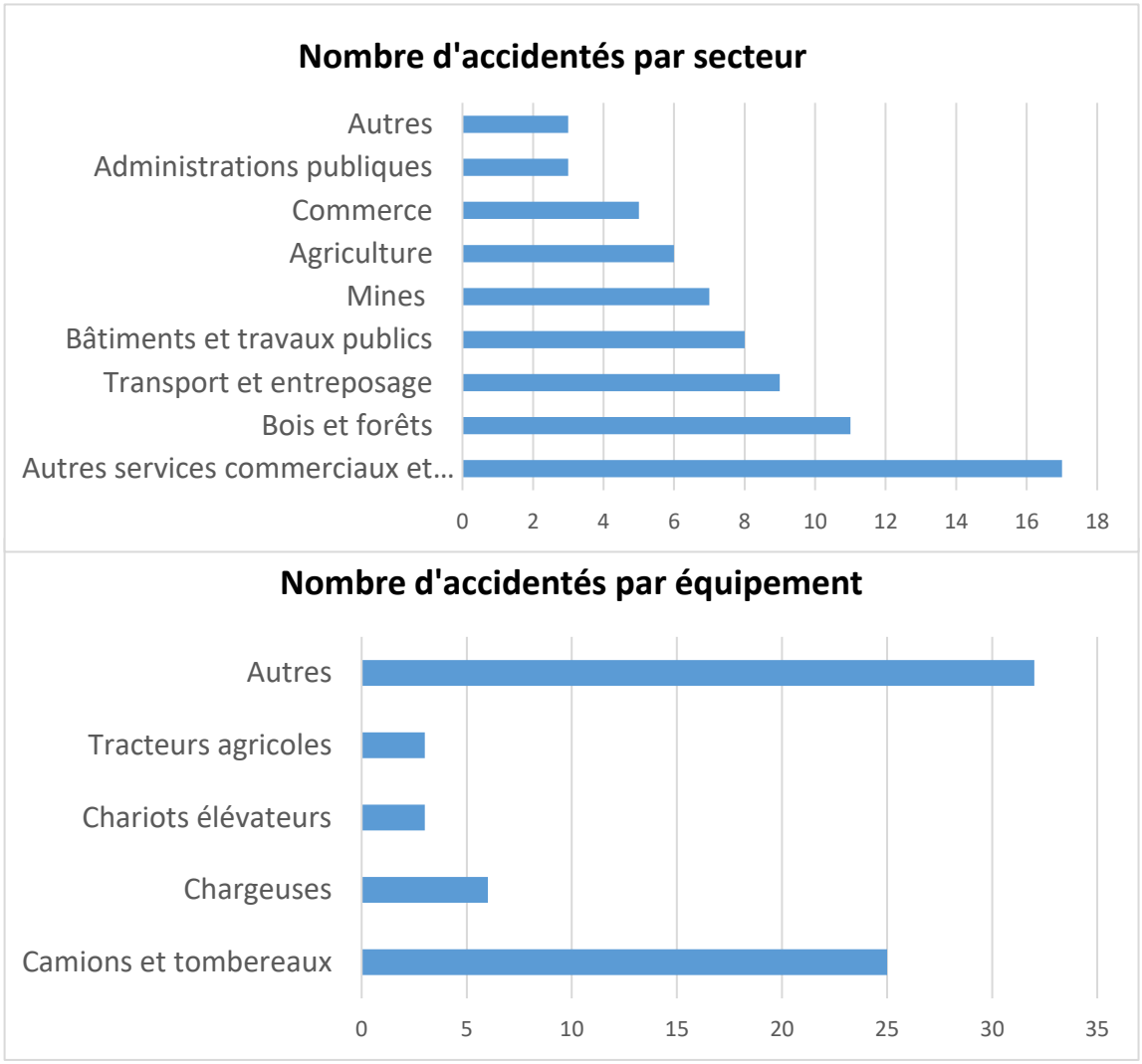


Figure 3.2 : Nombre d'accidentés graves ou mortels liés à la maintenance en fonction du secteur d'activité et du type d'équipements (Maintenance)

Tableau 3.2 : Nombre d'accidentés graves ou mortels liés à la maintenance type d'accident

Type d'accident	**Accidentés Maintenance**	**Exemple d'accident**
Chute d'un équipement en élévation/en hauteur	20	Un travailleur change un boyau hydraulique sur un chariot élévateur. Le mât est supporté par une poutre appuyée au sol. La poutre se désengage et une section du mât frappe la tête du travailleur.
Pièce en mouvement	19	Un employeur actionne la benne de sa camionnette. Cette dernière cesse de monter. Un travailleur s'introduit sous la benne pour ajouter de l'huile dans le système de levage et actionne accidentellement la commande de descente de la benne. Il est écrasé entre le châssis et la structure de la benne.
Véhicule en mouvement	13	Un travailleur est allongé sous le camion-chargeur. Il s'apprête à enlever une des trois parties de l'arbre de transmission afin de faciliter le remorquage du camion-chargeur. L'accident survient lorsque le camion-chargeur avance et que les roues arrière gauches écrasent le travailleur.
Explosion pneu / Déjantage	8	Un conducteur de camion est blessé par l'explosion d'un pneu de son tracteur routier. L'accident survient alors que le travailleur est étendu sous le tracteur routier pour vérifier le récepteur de freinage de la roue.
Explosion de réservoir	5	Un travailleur répare le système de freinage pneumatique d'un camion porteur. Le travailleur diagnostique l'obstruction d'une canalisation d'air du réservoir primaire. Muni d'un chalumeau au propane, il chauffe le robinet de purge. Le réservoir secondaire explose et heurte le travailleur.
Intoxication	4	Un employeur a été intoxiqué et a perdu conscience après être entré dans une citerne ayant servi à transporter du fumier de vache liquéfié. Il désirait enlever un obstacle qui s'était coincé dans la turbine de la citerne. Quatre personnes voulant lui prêter assistance ont également perdu conscience.

Activité de travail

Le tableau 3.3 fournit le nombre d'accidentés liés à la maintenance des équipements mobiles au Québec sur la période 2000-2013 selon le type d'activité faite par le travailleur, le lieu de survenance et la fonction du travailleur. Ces données permettent d'avancer que près de 80% des accidents pendant la maintenance sont survenus à l'extérieur de l'atelier. Les activités d'entretien/ajustement comptent pour plus de la moitié des cas recensés, tandis que les activités de déblocage et de nettoyage comptent pour 27% des accidentés.

Dans la plupart des cas, une procédure d'intervention improvisée et ne respectant pas le manuel du fabricant a été appliquée. De surcroît, les trois principaux types d'accidents recensés (c.-à-d. chute d'équipement en élévation, pièce en mouvement et équipement mobile en mouvement) sont directement liés à un problème d'application de procédure de type « cadenassage ou autre méthode de contrôle des énergies dangereuses ». Dans près de deux tiers des cas, ce n'est pas un mécanicien ou un technicien qui est intervenu, mais l'opérateur ou le conducteur de la machinerie mobile ou une autre personne.

Tableau 3.3 : Nombre d'accidents graves ou mortels liés à la maintenance des équipements en fonction de l'activité, du lieu et de la fonction du travailleur

Type d'activité	**Accidentés Maintenance**	**Lieu de l'accident**	**Accidentés Maintenance**	**Fonction de l'accidenté**	**Accidentés Maintenance**
Entretien/ Ajustement	42	Extérieur, cour/ stationnement	34	Opérateur/ Conducteur	27
Déblocage	14	Atelier	15	Mécanicien	16
Changement pneu	8	Extérieur, chemin/route	11	Technicien	8
Nettoyage	5	Extérieur, divers	9	Agriculteur/ Aide fermier	4
				Administrateur/ Superviseur	3
				Inconnue	11

3.2.2 Accidents liés à l'exploitation des équipements mobiles

Année et mois

Le Tableau 3.1 indique que l'année 2005 est l'année avec le plus grand nombre d'accidentés (graves et décès) pour l'exploitation des équipements mobiles au Québec avec 25, tandis que l'année 2010 est celle avec le moins d'accidentés avec 12. Aucune tendance forte ne peut être observée quant à l'évolution du nombre d'accidents sur la période observée. Selon le Tableau 3.1, le nombre d'accidentés durant les mois d'hiver est globalement plus faible que lors des autres périodes de l'année, contrairement à ce qui avait été noté pour la maintenance.

Secteur d'activité et types d'équipements

Selon la figure 3.3, le secteur des bâtiments et travaux publics est le secteur le plus touché (37%). Les autres secteurs sont : exploitation forestière (12%) ; transport et entreposage (12%); mines et carrières (10%); agriculture et agroalimentaire (8%) et commerce (7%). Bien qu'étant un des principaux secteurs d'activités, le secteur manufacturier et fabrication ne représente que 4% des accidents liés à des équipements mobiles. Par ailleurs, les équipements mobiles les plus impliqués sont les chariots élévateurs, les chargeuses, les tracteurs, les pelles mobiles et les camions.

Type d'accidents

Le tableau 3.4 présente le nombre d'accidentés (graves et décès) liés à l'exploitation des équipements mobiles au Québec sur la période 2000-2013 par type d'accident. Les accidents ont été classés selon 7 catégories. Les 3 principales causes retenues sont (i) mouvement de l'équipement dans son ensemble, (ii) renversement/basculement de l'équipement, et (iii) chute ou mouvement de la charge. Pour la plupart des accidents, l'énergie mécanique est en cause. Ce type d'énergie est souvent lié à des risques tels que l'écrasement, le coincement et le heurt par un équipement. L'énergie gravitationnelle est aussi associée à plusieurs accidents, comme les reversements, les basculements ou les chutes de personnes ou de charges.

En croisant les types d'accident en exploitation avec le type d'équipement, nous pouvons noter que :

- Les coincements et les écrasements pendant les manœuvres de recul concernent principalement les camions ;
- Les écrasements, les renversements et les chutes des charges concernent souvent les chariots élévateurs. D'autres risques sont liés aux chariots élévateurs tels que (i) les surcharges, (ii) les collisions avec obstacle en hauteur, (iii) les angles morts, (iv) le transport des personnes sans plateforme et mesures appropriées, (v) l'absence de bruit du moteur (chariot électrique), (vi) les explosions et incendies durant le chargement des batteries, et (vii) les fumées d'échappements ;
- Les renversements sont légèrement plus impliqués que les autres agents pour les tracteurs et les pelles mobiles.

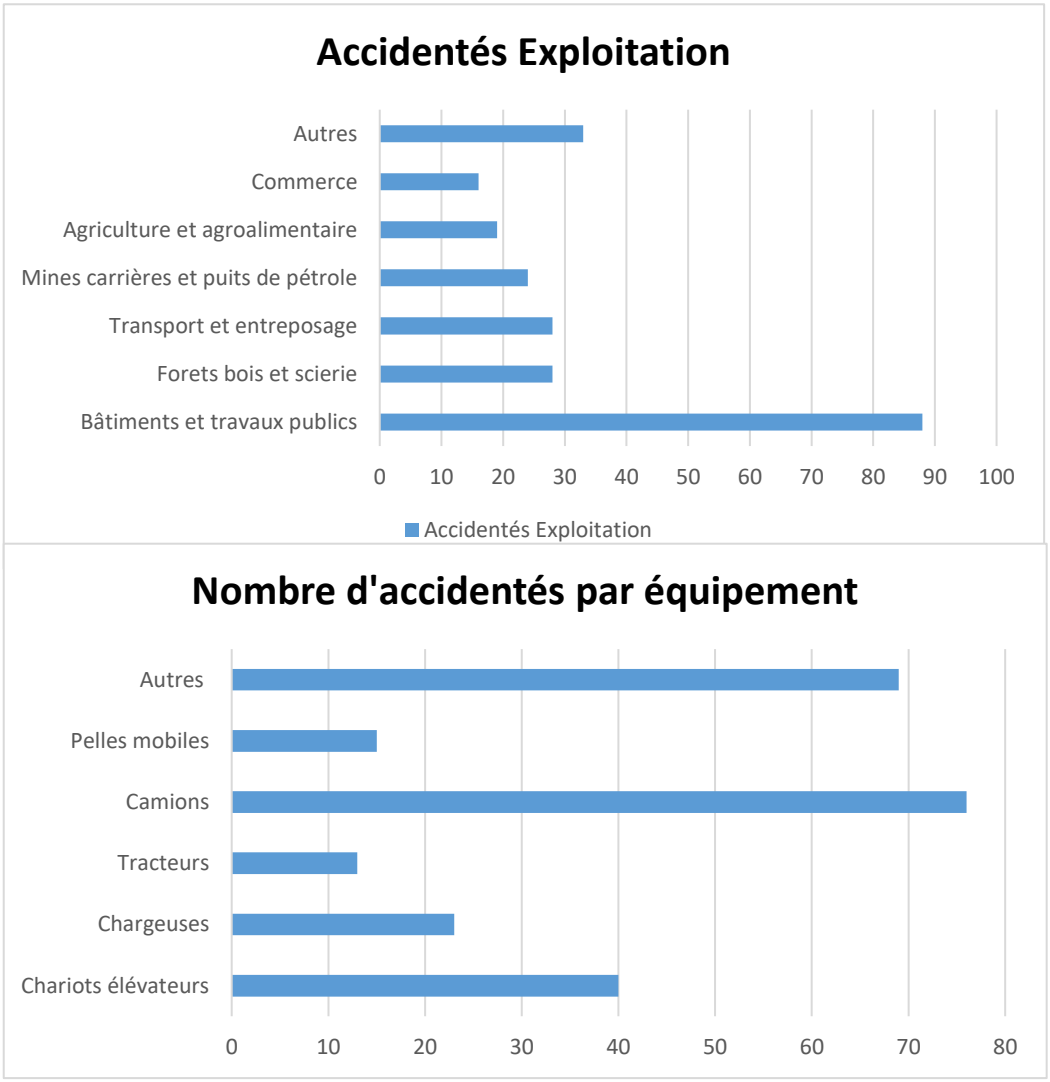


Figure 3.3 : Nombre d'accidentés graves ou mortels liés à l'exploitation en fonction du secteur d'activité et du type d'équipements (Exploitation)

Expérience et qualification

56% des accidentés durant l'exploitation des équipements mobiles ont plus de 5 ans d'expérience, 24% ont entre 1 et 5 ans d'expérience et finalement 20% ont moins d'une année d'expérience. L'occupation de l'accidenté n'était pas toujours clairement indiquée dans les rapports. Parmi les rapports où l'occupation était indiquée, on note 91 opérateurs impliqués en opérant l'équipement ou en se trouvant aux alentours de l'équipement. La formation, avec une partie pratique, et l'information restent indispensables pour une meilleure prévention des accidents, quelle que soit l'expérience du travailleur (Chinniah, 2015).

Tableau 3.4 : Nombre d'accidentés graves ou mortels liés à l'exploitation des équipements mobiles par type d'accident

Type d'accident	**Accidentés Exploitation**	**Exemple d'accident**
Équipement/véhicule en mouvement	97	Lors de la collecte des ordures dans un quartier résidentiel, le camion à ordures recule alors que l'aide-éboueur marche derrière le camion. Lors de cette manœuvre, l'aide-éboueur est écrasé mortellement par le camion.
Renversement/ basculement	39	Un opérateur de pelle hydraulique est écrasé mortellement lorsque celle-ci verse sur le côté lors de l'opération d'embarquement sur une remorque.
Chute/Mouvement de la charge	37	L'accident survient alors que les travailleurs procèdent à l'installation de la toiture avant d'une maison modulaire. La toiture, soulevée à l'aide d'un camion-grue à flèche télescopique, retombe sur les travailleurs.
Chute de la victime	23	Un travailleur œuvre sur une plate-forme élévatrice. Il fait une chute d'environ 5,5 mètres lorsque la plate-forme se détache subitement et tombe.
Composant en mouvement	30	Lors de la collecte de matières recyclables, un travailleur est coincé par le verseur de bac d'un camion lorsque celui-ci descend de façon intempestive.
Électrocution	6	Lors de la manutention de fermes de toit, le câble de levage du camion-grue se rapproche à moins de 3 m de la ligne électrique (25 kV). Un arc électrique se produit, le courant passe alors par le câble de levage, traverse le corps du travailleur et cause son électrocution.
Intoxication	2	L'accidenté, démarre sa scie à béton automotrice dans l'entrepôt situé à l'extrémité droite de l'établissement. Pendant que le moteur de la scie à béton fonctionne, le monoxyde de carbone (CO) envahit l'entrepôt et asphyxie la victime.
Autre	2	-

3.3 Causes retenues et risques spécifiques

Pour les accidents survenus durant des interventions de maintenance, les causes retenues par les inspecteurs du travail ont été principalement de nature organisationnelle :

- Procédures non sécuritaires ou absentes (34 rapports) ;
- Manque de formation ou connaissance des risques (15 rapports) ;
- Une gestion déficiente de la SST (13 rapports) et un manque de supervision (7 rapports).

Pour les accidents survenus durant l'exploitation des équipements mobiles, les causes retenues par les inspecteurs du travail ont été de nature encore une fois organisationnelle, mais aussi technique :

- Gestion déficiente de la santé et de la sécurité (49 rapports) ;
- Méthode de travail non sécuritaire, une absence de méthode de travail ou non-application de méthode de travail (40 rapports) ;
- Manque de formation (30 rapports) ;
- Manque ou déficience de supervision (26 rapports) ;
- Gestion déficiente de la circulation (13 rapports) ;
- Maintenance ou un entretien déficient de l'équipement (12 rapports). Le fonctionnement de l'équipement ou d'une partie de l'équipement peut devenir imprévisible à cause d'un mauvais entretien.

À noter que le manque de formation est souvent associé au manque de supervision dans un même rapport d'enquête.

3.4 Spécificités des machines mobiles

L'analyse des rapports a permis d'identifier un ensemble de sources de risques spécifiques aux équipements mobiles. Cet ensemble comprend :

- La mobilité des machines, leur transport et leur remorquage ;
- Les accidents de la route ;
- Les problèmes de visibilité, angles morts (collision engin-piéton) ;
- La stabilité de l'équipement (renversement, retournement, basculement) ;
- La stabilité du terrain (glissement, effondrement, affaissement) ;
- L'environnement du travail changeant ou inconnu (construction, fouilles avec des canalisations souterraines) ;
- La chute d'objets sur l'équipement ;
- La chute de hauteur depuis le dessus de l'équipement ;

- La chute de charge soulevée par la machine ;
- La chute du conducteur sortant ou accédant à la cabine ;
- La maintenance effectuée dans un environnement non maîtrisé (extérieur) ;
- L'électrisation/électrocution (contact avec lignes électriques) (Homce, 2001) ;
- L'usage hors limite, imprévu de l'équipement ;
- Les explosions et les intoxications dues aux émanations (moteurs à combustion interne) ;
- L'explosion de pneumatiques.

Les travailleurs piétons sont particulièrement vulnérables par rapport aux équipements mobiles. Ils sont exposés à des risques d'écrasement, de coincement ou de collision avec des équipements ou parties d'équipements en mouvement.

3.5 Actions de prévention

Plusieurs normes visent la sécurité des équipements mobiles, lors de la conception, l'exploitation ou la maintenance, telles que la norme CSA B335-15 pour les engins de levage (ex. chariots élévateurs), la norme ANSI Z245.1-2012 pour la sécurité des équipements mobiles pour la collecte, le transport et le compactage des déchets et des matériaux recyclables, etc. Nous trouvons également des normes qui s'intéressent aux principes ergonomiques lors de la conception des machines mobiles comme la norme CEN/TR 614-3:2011.

Pour une prévention efficace, des moyens de réduction de risque aussi bien techniques qu'organisationnels doivent être envisagés. Thomas (2012) a déterminé 10 points à prendre en considération lors de l'exploitation et la maintenance d'un équipement mobile :

1- Acquisition de l'équipement : avant de se procurer de l'équipement, analyser son besoin en tenant compte de la manière dont l'équipement sera utilisé et l'environnement de son exploitation pour un meilleur respect de ses limites.

2- Inventaire de l'équipement mobile : tout équipement doit être inventorié et enregistré afin de bien contrôler l'ensemble des équipements mobiles de l'entreprise et avoir une traçabilité et un historique des interventions de maintenance de ces équipements.

3- Mode d'emploi de l'équipement : le respect du mode d'emploi de l'équipement est nécessaire pour une utilisation sécuritaire, cela permet de garantir une utilisation dans les limites prévue lors de la conception.

4- Sécurité de l'environnement de travail : l'employeur ou l'exploitant de l'équipement mobile doit nécessairement identifier toutes les sources de dangers associés à l'utilisation de ces équipements à l'endroit où ils sont exploités et mettre en place les moyens pour contrôler ces dangers, notamment une gestion de circulation efficace.

5- Formation et qualification de l'opérateur : chaque opérateur doit être formé et évalué par une personne qualifiée. Cette formation doit être complétée selon le règlement et les normes en vigueur.

6- Exigences physiques : l'opérateur de l'équipement mobile doit répondre à un minimum d'exigences en matière d'aptitudes physiques pour l'exercice de ce métier.

7- Maintenance : la maintenance de l'équipement mobile doit se faire selon le règlement en vigueur, en respectant les instructions du fabricant et par du personnel formé et qualifié pour maintenir et réparer ce type d'équipement. Les interventions de maintenance doivent être documentées.

8- Procédures de travail : il faut élaborer des procédures de travail sécuritaire pour chaque type d'équipement mobile dans le respect des règlements et normes en vigueur et former les opérateurs sur ces procédures.

9- Sécurité des travailleurs piétons : l'employeur a la responsabilité d'assurer la sécurité des travailleurs piétons dans la zone d'exploitation de l'équipement mobile par une appréciation de risque et la mise en place des moyens pour minimiser les risques de collision.

10- Révision du programme : un programme sur les équipements mobiles doit être revu et, si nécessaire, corrigé de façon régulière pour s'assurer qu'il est à jour et compréhensible. Une revue doit être effectuée à chaque introduction d'un nouvel équipement ou au minimum tous les deux ans.

Plusieurs points concernant l'utilisation et la maintenance des équipements mobiles sont aussi réglementés (ex. RSST, art. 272 à 287). Pour une meilleure protection des employés intervenant lors de la maintenance de l'équipement, des mesures telles que le cadenassage, la maintenance

préventive et le diagnostic intégré aux équipements peuvent être mises en place. L'arrêt simple d'une machine ou d'un équipement n'est pas suffisant pour sécuriser les activités de maintenance à cause d'une éventuelle présence d'énergies résiduelles ou un démarrage intempestif dû, par exemple, à une erreur humaine. La norme CSA Z460-13 pour la « maîtrise des énergies dangereuses, cadenassage et autres méthodes » a d'ailleurs dédié une annexe aux équipements mobiles. Des procédures génériques de cadenassage existent pour les équipements mobiles et incluent les étapes suivantes :

1- Stationner l'équipement sur un terrain adéquat (ex. pas de pente).

2- Abaisser les accessoires (ex. godet) au niveau du sol ou les bloquer.

3- Appliquer le frein de stationnement.

4- Placer la transmission dans la position spécifiée par le fabricant pour le stationnement.

5- Désactiver les systèmes hydrauliques à l'aide des sélecteurs dédiés, le cas échéant.

6- S'assurer que tous les leviers sont au neutre.

7- Retirer la clé du démarreur, placer cette clé dans la boîte de cadenassage installée dans la cabine, et placer son cadenas personnel et une étiquette d'information sur la boîte, et/ou lorsque les clés de démarreur ne sont pas uniques, cadenasser le coupe-batterie (ASTIFO, 2004).

Par ailleurs, plusieurs accidents causés ont été causés par le manque de visibilité pour l'opérateur, en particulier lors des manœuvres de recul. Dans une étude sur la sécurité des équipements mobiles sur les chantiers de construction, quelques facteurs pouvant conduire à un accident par manque de visibilité ont été déterminés : (i) éclairage inadéquat, (ii) obstruction de visibilité et les angles morts (plus de 45% des accidents), et (iii) sens du mouvement (selon les équipements). Les auteurs de cette étude ont proposé des moyens de réduction de risque tels que :

- La familiarisation de l'opérateur avec les lieux, dont les endroits les plus fréquentés afin de faciliter la détection des piétons dans son entourage ;
- L'amélioration du champ de vision de l'opérateur dès la phase de la conception pour réduire les angles morts créés par la structure de l'équipement ;
- L'utilisation de moyens de communication pour signaler la présence d'un travailleur ou d'une situation dangereuse ;

- S’assurer que tous les véhicules sont équipés pour signaler les manœuvres de recul (lumières et alarme) ;
- Bien éclairer la zone de travail. L’importance de ce dernier facteur est souvent cachée derrière un agent causal plus évident comme « écrasé par un équipement », sans mentionner la vraie cause du problème qui est le manque d’éclairage et de visibilité (Hinze, 2011).

Par ailleurs, plusieurs technologies de détection de personnes à proximité des équipements mobiles peuvent être utiles si bien utilisées. L’INRS, en France, en a testé plusieurs (c.-à-d. ultrasons, marqueur radioélectrique, analyse d’images, radar, scrutateur laser) (INRS, 2015). Ainsi, les systèmes RFID, les scanners, les alarmes visuelles ou sonores, les allées de circulation avec protecteur et les limiteurs de vitesse sont des moyens qui peuvent améliorer la sécurité des piétons (Teizer et Mantripragada et al., 2010) (Teizer, Fullerton et al., 2010).

Finalement, un outil sous forme d’une liste de vérification est proposé au tableau 3.5 en se basant sur le règlement en SST du Québec et les résultats de l’analyse des accidents. Cet outil peut supporter les préventeurs dans leur travail.

Tableau 3.5 : Liste des vérifications *(Check list)* pour une évaluation rapide de la sécurité des machines mobiles

Points à vérifier	Oui	Non	Commentaires
Sécurité des travailleurs			
Les travailleurs ont-ils été formés et informés relativement aux dangers spécifiques reliés à l'utilisation des équipements mobiles ?			
La compréhension des instructions de sécurité par les employés est-elle évaluée? (Caffaro, 2015)			
L'aptitude physique des opérateurs est-elle examinée périodiquement par du personnel médical qualifié ? (vue, audition, état physique général)			
Le conducteur du véhicule ainsi que tout autre travailleur qui prend place au bord de véhicule, respectent-ils le port de la ceinture de sécurité ?			
Les opérateurs sont-ils bien informés des risques de travail à proximité des lignes électriques ?			
Selon les procédures de travail suivies, un travailleur peut-il demeurer sur le véhicule en mouvement ?			
Selon les procédures de travail suivies, le conducteur peut-il quitter le véhicule lorsque la partie mobile du dispositif qui sert à lever, tirer ou pousser une charge se trouve en position levée ?			
Équipements de sécurité			
Le port des équipements de protection individuelle est-il respecté? sont-t-ils correctement portés?			
Les opérateurs ou les travailleurs effectuant des tâches sur l'équipement portent-ils des gants souples qui assurent une bonne adhérence aux poignées et aux commandes du véhicule ?			
Le véhicule est-il muni d'un fanion si le véhicule est utilisé dans une cour ?			
Le véhicule est-il muni d'un extincteur portatif si le travail comporte des risques d'incendie ?			
La méthode de réapprovisionnement de véhicule en carburant est-elle sécuritaire ?			
Sécurité de l'équipement			
L'accès au véhicule est-il sécuritaire et facile (au moyen notamment d'un marchepied, de poignées ou d'une échelle.) ?			
En opérant le véhicule ou en pénétrant ou sortant de la cabine, y a-t-il un risque d'être heurté, coincé par une pièce du véhicule en mouvement ?			

Tableau 3.5 : Liste des vérifications *(Check list)* pour une évaluation rapide de la sécurité des machines mobiles (Suite et fin)

Le véhicule est-il muni d'un écran de protection, d'une cabine ou d'un cadre pour la protection contre les chutes de charge et les mouvements des objets manutentionnés ?			
Le véhicule est-il muni d'une structure de protection en cas de retournement ?			
L'état du surface du sol augmente-t-il le risque du basculement ou du retournement?			
Si l'équipement est équipé d'un treuil arrière, est-ce qu'il est équipé d'un écran			
Les sangles/câbles utilisés pour tirer des charges, peuvent-ils, en cas de rupture, provoquer un effet coup de fouet ?			
Le véhicule est-il muni de freins efficaces ?			
L'état des freins est-il vérifié périodiquement ?			
Le véhicule est-il pourvu d'un avertisseur sonore ?			
Les manœuvres de recul sont-elles assistées par un signaleur ?			
L'équipement est -il équipé d'un dispositif de détection de proximité?			
Lorsque l'équipement est utilisé à l'intérieur, la circulation est-elle sécuritaire? (Largeur des allées, miroirs, protecteurs)			
Les limites de poids et dimensions des charges sont-elles respectées lors de l'utilisation des équipements de levage mobiles?			
Maintenance, inspection et procédures de travail			
Une stratégie de maintenance préventive est-elle adoptée pour les équipements			
Les équipements sont-ils entretenus selon des échéanciers ? (Maintenance préventive ou corrective ?)			
La pratique de la maintenance corrective est-elle formalisée?			
Les taches de maintenance et les taches connexes sont-elles effectuées par des personnes qualifies et permanentes?			
Le véhicule est-il inspecté et entretenu conformément aux instructions du fabricant ou à des normes offrant une sécurité équivalente ?			
Lorsqu'une pièce du véhicule est réparée, résinée ou remplacée, cette pièce offre-t-elle une sécurité au moins équivalente à la pièce d'origine ?			
Lorsque l'équipement est sous réparation, une procédure de maîtrise des énergies dangereuses est-elle appliquée? (Cadenassage ou autres méthodes)			
L'historique des interventions de maintenance est-il documenté ?			
Lorsque des équipements mobiles à combustion sont utilisés à l'intérieure, le taux ventilation rencontre-t-il les exigences du règlement en vigueur ?			
Le taux de ventilation est-il vérifié périodiquement?			

3.6 Conclusion de l'analyse qualitative

Ce chapitre visait la détermination des circonstances entourant les accidents graves et mortels liés aux équipements mobiles au Québec. Le second objectif était de proposer des mesures visant à réduire les risques d'accident liés à ce type d'équipement. L'étude a porté sur 306 rapports d'accidents survenus au Québec entre 2000 et 2013 en lien avec des équipements mobiles. Ces rapports ont été divisés en deux principales catégories : les accidents liés à la maintenance (62), et ceux liés à l'exploitation (219). Il en est ressorti que les camions et les tombereaux sont à l'origine de la plupart des accidents tant pour la maintenance (36% des accidentés) que l'exploitation (32% des accidentés), suivis par les chariots élévateurs et les chargeuses pour l'exploitation.

Les principaux types d'accidents rencontrés sont les chutes d'équipements en élévation ou en hauteur, les pièces en mouvement pour la maintenance, et les équipements en mouvement pour l'exploitation. Les principales causes retenues sont le manque de formation et la méconnaissance des risques, le manque de supervision, l'utilisation de méthodes de travail non sécuritaires et la gestion déficiente de la santé et de la sécurité de la part de l'employeur pour la maintenance. La mauvaise gestion de la circulation et la maintenance déficiente de l'équipement ou d'un composant de l'équipement sont parmi les principales causes d'accidents engendrés par les équipements mobiles en exploitation.

Les spécificités des machines mobiles ont été identifiées. Des moyens de prévention sont présentés et un outil sous forme d'une liste de vérification est proposé.

CHAPITRE 4 ANALYSE QUANTITATIVE DES ACCIDENTS ENGENDRÉS PAR DES ÉQUIPEMENTS MOBILES

4.1 Préambule

Les résultats de l'étude qualitative présentée dans le chapitre précédent était basée sur une analyse manuelle pour déterminer les causes principales (récurrentes) des accidents reliés aux machines mobiles. Cette méthode, laborieuse et peu précise, est difficilement généralisable puisqu'un simple changement de période ou d'endroit d'étude pourrait modifier radicalement les résultats. De plus, le fait de se concentrer sur les causes les plus récurrentes conduit à la négligence d'autres causes plus rares, mais qui ont aussi conduit à des accidents graves et mortels.

Les solutions proposées sont génériques et tiennent seulement compte des spécificités de chaque accident telles que (i) le secteur d'activité (ii) l'équipement en cause (iii) la saison, (iv) le quart de travail, etc. Cependant, elle représente un point de départ pour l'étude des problèmes plus spécifiques touchant les accidents causés par les machines mobiles comme :

- L'étude des accidents engendrés par les machines mobiles dans un secteur précis (ex. : mines, constructions, agriculture) ;
- L'étude d'un type particulier de machine (ex. : camions, chariots élévateurs, tracteurs agricoles, …) ;
- L'étude plus approfondie d'un problème technique (ex. : avertissement lors des manœuvres de recule, port de ceinture de sécurité, les angles morts).

4.2 Formatage des données

A partir des données de l'étude qualitative, certains facteurs ont été ajoutés ou formatés selon les modèles statistiques ou de fouille de données, notamment :

- Le quart de travail au moment de l'accident : selon une étude de Folkard (2003) la sécurité et la productivité sont influencées négativement durant le quart de nuit. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette détérioration (ex. : rythme circadien, manque de sommeil, faible supervision). Les auteurs ont trouvé également que le risque d'accident augmente en passant de jour au soir et de soir à la nuit ;

- La saison : remplacer les 12 mois de l'année par les deux saisons correspondant aux deux états du climat dans la province du Québec. Cela permet de diminuer le nombre de modalité de ce facteur;
- Classifier les causes de chaque accident selon les éléments MELITO (Moment, équipement, lieu, individu, tâche, organisation) au lieu de la description textuelle. MELITO est un outil qui aide à décrire et collecter les données d'un accident. Chaque cause d'accident est liée à un des éléments MÉLITO. Le tableau 4.1 présente un ensemble de situations ou chaque élément MELITO est relié à une ou plusieurs causes d'un accident (CPSSTQ, 2004).

Tableau 4.1 : Éléments MELITO

MELITO	**Situations**
Le moment	- Quel jour et à quelle heure s'est produit l'accident ? - Est-ce que l'employé effectuait des heures supplémentaires au moment de l'accident ? - Travaillait-il en rotation ? - Cette tâche était-elle réalisée en période occupée ? - Normalement, exerce-t-on cette tâche à ce moment-là ?
Les équipements, outils, matériaux	- Quel genre d'équipement, machine, outil, objet ou substance utilisait le travailleur au moment de l'accident (nom, numéro, marque, modèle, année de fabrication…) ? - Dans quel état se trouvait l'appareil au moment de l'accident ? - Était-il en bonne condition ? - Cet appareil a-t-il nécessité des réparations récemment ? - À quand remonte la dernière inspection ? - Y a-t-il un programme écrit d'inspection et d'entretien de l'équipement dans l'établissement ? - Cet appareil contient-il d'autres pièces que les originales ?
Le lieu	- Est-ce le lieu de travail habituel du travailleur ? Si non, le connaissait-il suffisamment ? - Les allées de circulation s'avéraient elles libres, dégagées, propres ? - Quelles étaient les conditions physiques de l'environnement du poste de travail au moment de l'accident ? Sol sec ou humide ? Présence de graisse ou d'huile sur celui-ci ? - Quelle était La température ambiante ? - Quel était le niveau d'éclairage ? De bruit ambiant ? De contaminants dans l'air ? - Dans quel état se trouvait le système de ventilation ?

Tableau 4.1 : Éléments MELITO (Suite et fin)

L'individu	- Combien d'heures avait-il travaillées depuis le début de la journée, de la semaine ? - Exige-t-on un certificat de qualification ou une carte de compétence pour exécuter cette tâche ? - Remplissait-il sa fonction habituelle ou était-ce un nouvel emploi ? - Remplaçait-il quelqu'un au moment de l'accident ? - Quelle est son expérience dans cette tâche ? S'agissait-il d'une nouvelle tâche ? - Quel équipement de protection individuelle le travailleur portait-il au moment de l'accident ?
La tâche	- Au moment de l'accident, quelle tâche exécutait le travailleur blessé ? - Cette tâche fait-elle partie intégrante de son travail ? - Le travailleur a-t-il reçu la formation technique pour la réaliser ? - Existe-t-il des règles de sécurité propres à cette tâche ? - Devait-il exécuter cette tâche dans une limite de temps ?
L'organisation	- De quelle façon la formation de base est-elle transmise aux travailleurs ? - Exerce-t-on un contrôle des méthodes de travail ? - Le supérieur immédiat avait-il expliqué la tâche au travailleur ? - Existe-t-il un programme de formation pour les nouveaux travailleurs ? - Existe-t-il des normes de sécurité propres à l'entreprise ? - L'employeur met-il à la disposition des travailleurs tous les équipements requis pour effectuer leurs tâches ? - Quel est le mode de supervision ?

Tableau 4.2 : Nombre d'accidents par élément MELITO

Élément	**Nombre d'accidents**
Moment	3
Équipement	148
Lieu	63
Individu	120
Tache	132
Organisation	170

Le nombre d'accidents par élément est principalement reparti entre l'équipement, l'individu, la tâche et l'organisation (Tableau 4.2). Seulement trois accidents ont des causes appartenant au moment. Ceci est probablement dû au fait que les causes liées au moment sont généralement cachées par des causes plus apparentes même si le moment a contribué dans l'accroissement du risque.

4.2 Méthodes de modélisation

Quatre méthodes d'identification des facteurs les plus influents sur le risque d'occurrence des accidents causés par les machines mobiles ont été utilisées. La comparaison des résultats de chaque méthode a servi de moyen de validation.

Dans un premier temps, un modèle de régression logistique a été construit étant donné que la sortie est dichotomique (accident mortel, accident grave). La deuxième méthode utilisée est la régression multiple. Dans ce cas, une transformation des données a été effectuée pour avoir une sortie continue. La troisième méthode est une technique de classification supervisée de fouille de données appelée l'analyse logique des données. Elle permet de générer des résultats tout en contournant des contraintes rencontrées habituellement lors des approches par modèle (*model driven approaches*). La quatrième méthode est le modèle de risque proportionnel de Cox. Il s'agit d'un des modèles de survie les plus utilisés. Il a été ajusté pour exploiter les données d'expérience comme données de survie.

4.3 Modèle de régression logistique

Les modèles de régression logistique sont des méthodes multivariées privilégiées dans le cas où la variable dépendante (la réponse) est qualitative (dichotomique ou polytomique). De plus, ils représentent plusieurs avantages comme la non-exigence de la normalité des données ou l'homogénéité de la variance comme le cas de la régression multiple. Ces modèles permettent d'estimer la probabilité qu'un évènement survient ou non. Cette estimation est donnée par la fonction logistique *f* comme suit :

$$f(X) = \frac{1}{1+e^{-X}}$$

Où X représente la variable de sortie (variable dépendante). Dans le cas où X est une combinaison linéaire de plusieurs variables x_i telle que $X = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i$ alors la fonction logistique s'écrit comme suit :

$$f(X) = \frac{1}{1+e^{-\left(\beta_0+\sum_{i=1}^{n}\beta_i x_i\right)}}$$

4.3.1 Codification des variables

Dans notre cas, la variable de sortie X possède deux degrés de sévérité :

- X = 0 (accident mortel)
- X = 1 (accident grave)

Les prédicteurs catégoriels

Une variable catégorielle est une variable où la grandeur mesurée n'est pas une quantité. Les valeurs que cette variable pourrait prendre s'appellent des modalités ou des classes. Dans notre cas, nous avons 6 variables catégorielles :

1-Saison : Selon la date de survenance de l'accident :

- Été si l'accident survient entre 1er avril et 30 novembre ;
- Hiver si l'accident survient entre 1er décembre et 31 mars.

2-Activité : Selon la tâche effectuée par l'accidenté au moment de l'accident :

- Maintenance si l'accident survient lors des travaux de maintenance, ajustement, déblocage, nettoyage, etc. ;
- Exploitation si l'accident survient lors des opérations régulières de l'équipement.

3-Quart de travail : Selon le moment de la survenance de l'accident :

- Jour : entre 6h et 14h ;
- Soir : entre 14h et 22h ;
- Nuit : entre 22h et 6h.

4-Catégorie d'équipements : Cette variable indique le secteur où l'équipement en cause est principalement utilisé, mais pas nécessairement le secteur où il a causé le problème. Par exemple, la catégorie d'un camion est « transport routier » mais pourrait engendrer un accident sur un chantier de construction.

Les modalités pour ce facteur sont :

- **Forestier est agricole** si l'équipement en cause est principalement utilisé pour des travails spécifiques au secteur forestier ou agricole ;
- **Transport routier** si l'équipement en cause est principalement utilisé pour des opérations de transport routier ;

- **Transport divers** si l'équipement en cause est principalement utilisé pour opérations de transport autre que le transport routier (ex : équipement de manutention) ;
- **Construction et voirie** si l'équipement en cause est principalement utilisé pour des travails spécifiques au secteur de construction et de voirie.

5-Énergie : Selon l'énergie en cause :

- **Mécanique** : si l'accident est causé par le déplacement de l'équipement ou le mouvement d'une pièce de l'équipement ;
- **Gravité** : si l'accident est causé par la chute de l'équipement, de l'accidenté ou d'une charge soulevée par l'équipement ;
- **Chimique ou électrique** : si l'accident est causé par électrocution, intoxication ou explosion.

6-Secteur : Selon le secteur économique où l'accidenté travaillait.

Une description de chaque secteur est fournie dans le tableau 4.3 (Entreprises Québec, 2016).

Tableau 4.3 : Description des secteurs d'activité

Secteur	**Description**
Agriculture	Les cultures agricoles (céréales, légumes, fruits, culture en serre et en pépinière) ; L'élevage (bovins, porcs, volaille et œufs, moutons, chèvres, aquaculture, apiculture) ; La pêche, la chasse et le piégeage ; Les activités de soutien à l'agriculture et à la foresterie (ensemencement, contrôle des insectes, reboisement).
Mines	L'extraction de pétrole et de gaz ; L'extraction minière et l'exploitation en carrière (extraction de charbon. de minerais métalliques et non métalliques); Les activités de soutien à l'extraction minière et à l'extraction de pétrole et de gaz (forage).

Tableau 4.3 : Description des secteurs d'activité (Suite et fin)

Transport et entreposage	Le transport aérien ; Le transport ferroviaire ; Le transport par eau ; Le transport par camion ; Le transport en commun et transport terrestre de voyageurs ; Le transport par pipeline ; Le transport de tourisme et d'agrément ; Les activités de soutien au transport ; Les services postaux ; Les messageries et services de messagers ; L'entreposage (entreposage général, frigorifique, de produis agricoles, de biens domestiques).
Foresterie	Foresterie et exploitation foresterie
Construction et travaux publiques	La construction de bâtiments résidentielle et non résidentielle (bâtiments industriels, à usage commercial et institutionnel) ; Les travaux de génie civil (routes, rues, ponts, barrage) ; Les entrepreneurs spécialisés (charpenterie, maçonnerie, électricité, plomberie, chauffage, climatisation, isolation, peinture, revêtement de sol, menuiserie).
Commerce	Commerce de gros
Administration publique	Les administrations fédérales, provinciales, municipales et autochtones.
Autre services personnels et commerciaux	Les services de réparation et entretien Les services de soins personnels et blanchissage (coiffure, esthétique, salons de beauté, de bronzage, de tatouage, studios de massage, services funéraires, soins pour animaux de maison, développement de photos, stationnements et garages, vestiaires, toilettes publiques) ; Les organismes religieux, fondations, groupes de citoyens et organisations professionnelles (organismes d'action sociale, communautaires, civiques et amicales) ; Les ménages privés (personnel domestique, gardiennage, gouvernante). Commerce de détail.

Variable continue

Expérience : représente le nombre de mois d'expérience de l'accidenté au moment de l'accident. La prise en considération de la variable « expérience » a fait diminuer la taille de la base de données puisque sur les 281 rapports d'accident analysés, l'expérience de l'accidenté a été précisée dans 119 cas seulement. De ces 119 cas, 13 ont été retirés pour résoudre un problème de séparation quasi complète. Les séparations complète et quasi complète sont des problèmes couramment rencontrés en régression logistique. Ces problèmes arrivent lorsque la variable de sortie sépare un prédicateur ou une combinaison de prédicateurs de façons complète ou presque complète. Les observations

correspondantes à la modalité « commerce » pour le facteur « secteur » et la modalité « électrique chimique » pour le facteur « énergie » sont parfaitement séparées par la variable de sortie puisque la conséquence correspondante était le décès dans ces observations. Les coefficients des modalités ainsi que les rapports de risque (*odds ratios*) sont calculés à la base des références présentés dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Modalités de références pour chaque facteur

Facteur	**Modalité de références**
Saison	Été
Activité	Maintenance
Quart	Nuit
Catégorie d'équipement	Forestier et agricole
Énergie	Gravité
Secteur	Agriculture

4.3.2 Estimation des paramètres du modèle Logistique

Le tableau 4.5 présente les résultats obtenus.

Tableau 4.5 : Valeurs estimées des paramètres du modèle Logit

Effect	**Level of effect**	**Column**	**Estimate**	**Standard**	**Wald**	**p**
Intercept		1	2,52020	0,668073	14,23054	0,000162
Experience		2	-0,00041	0,002541	0,02616	0,871520
Saison	Hiver	3	0,29296	0,311964	0,88190	0,347682
Activité	Exploitation	4	-0,23901	0,413664	0,33384	0,563410
Quart	Jour	5	-0,26404	0,502264	0,27637	0,599091
Quart	Soir	6	0,10194	0,544216	0,03509	0,851411
Categorie equipement	Construction et voir	7	-1,23040	0,625223	3,87277	0,049075
Categorie equipement	Transport Routier	8	-0,14325	0,642921	0,04965	0,823681
Categorie equipement	Transport divers	9	0,31758	0,773973	0,16836	0,681569
Energie	Mecanique	10	0,00849	0,350283	0,00059	0,980652
Secteur	Adm pub-autres	11	-0,35108	0,609488	0,33180	0,564600
Secteur	Mines	12	0,51149	1,019758	0,25159	0,615961
Secteur	Construction	13	0,18309	0,655865	0,07793	0,780121
Secteur	Forestier	14	0,16246	0,779226	0,04347	0,834844
Secteur	Transport et entrep	15	0,44083	1,024872	0,18501	0,667103

La colonne « Estimate » indique l'estimation des paramètres qui représentent le poids de chaque variable ou modalité de variables dans le calcul de la probabilité d'avoir un niveau de sévérité 0 (mortel). La dernière colonne « p » donne le p-value de chaque modalité de facteur. Il apparait clairement que la plupart des facteurs ont un p-value trop élevé. Le p-value pour chaque facteur teste l'hypothèse nulle H_0 que le coefficient correspondant est égal à zéro, c'est-à-dire, qu'il n'a pas d'effet. Une faible valeur du p-value (habituellement < 5%) indique le rejet de l'hypothèse nulle. Autrement, un facteur avec une faible p-value signifie que ce facteur a plus de poids dans le modèle et est susceptible d'influencer considérablement le résultat.

Le modèle de régression logistique permettant de prédire la probabilité qu'un accident soit mortel est le suivant :

$$P\left(sévérité = mortel\right) = \frac{1}{1+e^{-A}}$$

$$\begin{aligned} A = {} & 2,52 - 0,00041Exp + 0,29Hiver - 0,239Exploi - 0,26Jr + 0,10Sr \\ & -1,23Cons - 0,14TranR + 0,31TranD + 0,00084Mec - 0,35AdmA \\ & + 0,51Min + 0,18Consruction + 0,16Fores + 0,44TranE \end{aligned}$$

Avec :

Pour les facteurs catégoriels, la valeur est 1 pour la modalité observée et 0 pour le reste.

4.3.3 Rapports des cotes (*Odds Ratios*)

Le rapport des cotes est une mesure permettant de quantifier la relation entre la présence ou l'absence d'un facteur et la survenance ou non d'un évènement.

Pour cette partie, les deux évènements sont, soit accident grave non mortel noté p, soit un accident mortel noté q.

Le rapport des cotes est donc calculé par la formule suivante :

$$\frac{p/(1-p)}{q/(1-q)}$$

La colonne « Odds ratio » du tableau 4.6 nous indique le risque d'avoir la sévérité 0 (mortel) par rapport à l'état de référence.

Tableau 4.6 : Rapports de risque par rapport à la modalité de références

Effect	Level of effect	Column	Odds ratio	P
Intercept		1		
Expérience		2	0,999589	0,871520
Saison	Hiver	3	1,796657	0,347682
Activité	Exploitation	4	0,620011	0,563410
Quart	Jour	5	0,653021	0,599091
Quart	Soir	6	0,941614	0,851411
Catégorie équipement	Construction et voirie	7	0,101625	0,049075
Catégorie équipement	Transport Routier	8	0,301399	0,823681
Catégorie équipement	Transport divers	9	0,477834	0,681569
Énergie	Mécanique	10	1,017135	0,980652
Secteur	Adm pub-autres	11	1,814331	0,564600
Secteur	Mines	12	4,298594	0,615961
Secteur	Construction	13	3,095306	0,780121
Secteur	Forestier	14	3,032110	0,834844
Secteur	Transport et entreposage	15	4,005310	0,667103

4.3.4 Analyses et commentaires

Nous remarquons tout d'abord que l'implication d'un équipement de catégorie « construction et voirie » dans l'accident est le facteur le plus significatif dans la sévérité de l'accident. Par ailleurs, il est facile d'en déduire ce qui suit.

Expérience. Le fait de varier le nombre de mois d'expérience de 1 mois laisse le risque d'avoir un accident mortel presque inchangé. On peut donc dire qu'on a une absence d'effet de l'expérience sur la probabilité d'avoir une sévérité donnée de l'accident.

Saison. Un accident survenu en hiver a 1,79 plus de risque d'être mortel qu'un accident survenu en été. L'effet des mois d'hiver est donc aggravant.

Activité. Un accident survenu durant l'activité maintenance a 1,61 fois plus de chance d'être mortel par rapport à un accident survenu lors de l'exploitation régulière de l'équipement.

Quart de travail. Un accident survenu la nuit à 1,53 fois plus de chance d'être mortel par rapport à un accident survenu le jour et 1,06 fois plus de chance d'être mortel par rapport à un accident survenu le soir. L'effet de quart de travail est absent entre le soir et la nuit, mais considérable en passant de jour au soir ou de jour à la nuit.

Catégorie d'équipement.

Un accident causé par des équipements d'agriculture ou d'exploitation forestière a 9,9 fois plus de chance d'être mortel par rapport à un accident causé par un équipement de construction ou de voirie.

Un accident causé par des équipements d'agriculture et d'exploitation forestière a 3,3 fois plus de chance d'être mortel par rapport à un équipement de transport routier.

Un accident causé par des équipements d'agriculture et d'exploitation forestière a 2,09 fois plus de chance d'être mortels par rapport à un accident causé par un équipement de transport divers.

Énergie. Pour ce facteur, il y a normalement trois modalités (mécanique, gravité, électrique ou chimique). Cependant, pour résoudre le problème de la séparation quasi complète, les observations correspondant à électrocution, intoxication et explosion ont été supprimées puisqu'elles ont toutes le décès comme conséquence. Les accidents où l'énergie mécanique (équipement en mouvement, pièces en mouvement) était en cause ont 1.01 fois plus de chance d'être mortels par rapport à l'accident où la gravité était en cause (chute d'équipement, chute de l'accidenté, chute de charge soulevée par l'équipement). Notons une absence de l'énergie en cause dans la sévérité de l'accident.

Le secteur d'activité. Le problème de séparation quasi complète a été rencontré de nouveau pour ce facteur. Plus précisément avec la modalité « Commerce » où toutes les observations correspondent à des décès.

Un accident survenu dans le secteur « Autre services commerciaux et personnels-administrations publiques » a 1,81 fois plus de chance d'être mortel par rapport à un accident survenu dans le secteur de l'agriculture.

Un accident survenu dans le secteur des mines a 4,3 fois plus chance d'être mortel par rapport à un accident survenu dans le domaine de l'agriculture.

Un accident survenu dans le secteur de la construction et des travaux publics à 3 fois plus de chance d'être mortels par rapport à un accident survenu dans le secteur de l'agriculture.

Un accident survenu dans le secteur de la foresterie a 3 fois plus de chance d'être mortel par rapport à un accident survenu dans le secteur de l'agriculture.

Un accident survenu dans le secteur de transport et d'entreposage a 4 fois plus de chance d'être mortel par rapport à un accident survenu dans le secteur de l'agriculture.

En résumé, nous pouvons conclure que :

- L'effet de l'expérience sur la sévérité de l'accident est négligeable ;
- Les accidents en maintenance sont plus graves par rapport aux accidents en exploitation ;
- Les opérations de maintenance ou d'exploitation sont plus risquées en hiver ;
- La sécurité est meilleure le jour par rapport au soir et nuit ;
- Les équipements de la foresterie et de l'agriculture sont souvent mortels ;
- Les électrocutions, les intoxications et les explosions sont souvent mortelles ;
- Être frappé par un équipement ou une pièce en mouvement, ou écrasé par un équipement en élévation, une chute de charge soulevée par l'équipement, ou la chute de l'accidenté ne change pas significativement la sévérité de l'accident ;
- Les accidents survenus dans les secteurs des mines, de construction et de transport et entreposage sont les plus sévères.

4.4 Modèle de régression linéaire multiple

L'objectif principal de cette méthode est de trouver la relation entre la variable dépendante (de sortie) et une ou plusieurs variables d'être (prédicteurs) en mesurant l'effet de chaque prédicteur sur la réponse et en prédisant la valeur de sortie. Contrairement à la régression logistique, la régression linéaire multiple exige plusieurs conditions pour son application.

Le modèle de régression linéaire multiple s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$Y = \beta^T X + \varepsilon$$

Avec

$$Y=\begin{pmatrix} y1 \\ \vdots \\ yn \end{pmatrix} ; \beta=\begin{pmatrix} \beta 0 \\ \vdots \\ \beta m \end{pmatrix} ; X=\begin{pmatrix} 1 & X11 & \cdots & Xm1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X1n & \cdots & Xmn \end{pmatrix} ; \varepsilon=\begin{pmatrix} \varepsilon 1 \\ \vdots \\ \varepsilon n \end{pmatrix}.$$

Où ε représente l'erreur.

4.4.1 Modélisation de la variable de sortie

Puisque l'utilisation de la variable de réponse dichotomique initiale (accident grave non mortel, accident mortel) n'est pas adaptée pour l'ajustement d'un modèle de régression linéaire multiple, trouver une autre variable de réponse continue tout en gardant les mêmes variables d'entrée est nécessaire. Pour ce faire, l'outil de diagnostic MELITO a été utilisé pour lier chaque cause d'accident déterminée par les inspecteurs de la CNESST à un ou plusieurs éléments de MELITO.

Tout d'abord, un poids de 1 à 6 a été attribué à chaque élément sur la base du coût ou de la complexité de la mesure de prévention qui correspond à chaque cause comme suit :

- 6 si la cause est reliée à l'équipement ;
- 5 si la cause est reliée au lieu ;
- 4 si la cause est reliée à l'organisation ;
- 3 si la cause est reliée à la tâche ;
- 2 si la cause est reliée à l'individu ;
- 1 si la cause est reliée au moment.

Par la suite, nous faisons la somme des poids pour chaque accident. Cette somme reflète le degré de difficulté à prévenir ou éviter un accident semblable.

Exemple :

Un accident est survenu le mois de juin 2007 lors d'une récolte des matières recyclables. Un éboueur actionne le treuil relié au crochet de levage pendant qu'un autre éboueur ramasse les matières recyclables au pourtour du conteneur. Lorsque le conteneur atteint une hauteur d'environ 1,2 m, le crochet de levage sort de l'œillet du conteneur. Ce dernier tombe sur l'éboueur qui se trouve alors en-dessous du conteneur.

Les causes de l'accident selon les inspecteurs de la CNESST sont les suivantes :

- La méthode utilisée pour vider les conteneurs est dangereuse ;
- Le matériel de levage et son installation comportent des lacunes. L'entretien du câble d'acier est déficient.

Dans ce cas, on remarque que la première cause est directement liée à la tâche non sécuritaire. Le pointage pour cette cause est de 3. La deuxième cause est directement liée à l'équipement. Le

pointage pour cette cause est 6. La somme pondérée pour cet accident est donc 9. La même démarche a été suivie pour le reste des accidents.

4.4.2 Résultats

Pour cette méthode, deux choix ont été testés, soient l'utilisation de la base de données complète sans la donnée d'expérience et l'utilisation de la base de données réduite avec les données d'expérience. Le meilleur des deux modèles est choisi.

Base de données complète sans données d'expérience

Le tableau 4.7 représente la qualité d'ajustement du modèle. Le premier critère de la qualité de modèle de régression est le R^2 multiple (un minimum de 70%). Dans ce cas, le R^2 multiple est de 7%. Le modèle est donc de très mauvaise qualité. Les résultats doivent quand même être considérés aux fins de comparaison et de validation des résultats du modèle de régression logistique, d'une part, et avec le modèle ajusté à partir de la base de données réduite avec données d'expérience, d'autre part.

Tableau 4.7 : Résultats avec base de données complète sans données d'expérience

	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (multiple22.sta)										
Dependent Variable	Multiple R	Multiple R^2	Adjusted R^2	SS Model	df Model	MS Model	SS Residual	df Residual	MS Residual	F	p
Rang	0,274847	0,075541	0,023213	251,4627	15	16,76418	3077,363	265	11,61269	1,443609	0,126932

Le tableau 4.8 illustre les valeurs estimées des paramètres représentant le poids de chaque modalité de variable dans le rang de l'accident. La valeur du rang de l'accident pourrait nous donner la possibilité d'examiner toutes les combinaisons d'origine de causes possibles : plus le rang est élevé plus les causes sont plus difficiles ou plus couteuses à éliminer ou à prévenir. L'inconvénient de cette méthode réside dans la réciprocité de l'interprétation. Car la seule manière d'exploiter la valeur prédite du rang est de prendre en considération toutes les combinaisons menant à cette valeur.

Tableau 4.8 : Valeurs estimées des paramètres du modèle de régression linaire avec la base de données complète sans données d'expérience

Effect	Parameter Estimates (multiple22.sta) Sigma-restricted parameterization Level of Effect	Column	Rang Param	Rang Std.Err	Rang T	Rang p	-95,00%	+95,00%
Intercept		1	8,99404	0,465387	19,32595	0,000000	8,07771	9,910368
Saison	Hiver	2	-0,13433	0,217647	-0,61720	0,537636	-0,56287	0,294206
Quart	Jour	3	0,05492	0,355449	0,15452	0,877317	-0,64494	0,754788
Quart	Soir	4	-0,03326	0,382859	-0,08686	0,930847	-0,78709	0,720577
Secteur	Adm pub-Autres	5	-0,10291	0,482602	-0,21324	0,831301	-1,05313	0,847310
Secteur	Commerce	6	0,04260	0,699434	0,06091	0,951474	-1,33455	1,419759
Secteur	Mines	7	-0,18493	0,605469	-0,30543	0,760277	-1,37707	1,007212
Secteur	Construction	8	0,54144	0,443146	1,22180	0,222869	-0,33110	1,413971
Secteur	Forestier	9	0,42640	0,583867	0,73031	0,465846	-0,72321	1,576013
Secteur	Transport et entrep	10	-1,43645	0,597928	-2,40238	0,016977	-2,61374	-0,259155
Categorie	Transport divers	11	0,19546	0,447111	0,43717	0,662342	-0,68488	1,075807
Categorie	Construction et voirie	12	0,42958	0,389722	1,10226	0,271348	-0,33777	1,196920
Categorie	Transport routier	13	0,36922	0,403136	0,91587	0,360566	-0,42454	1,162979
Activité	Exploitation	14	0,38018	0,264866	1,43536	0,152363	-0,14133	0,901689
energie	Mecanique	15	-0,87014	0,388787	-2,23809	0,026046	-1,63564	-0,104634
energie	Gravite	16	-0,25244	0,385229	-0,65530	0,512841	-1,01094	0,506057

$$Rang = 8,99 - 0,13Hiv + 0,05Jr - 0,03Sr - 0,1AdmA + 0,04Comm - 0,18Min + 0,54Cons + 0,42Fores - 1,43TransE + 0,19TranD + 0,42ConsV + 0,36TranR + 0,38Expl - 0,87Mec - 0,25Grav$$

Base de données réduite avec données d'expérience

Dans ce cas, seules les observations avec l'expérience de la victime au moment de l'accident sont considérées. Nous constatons tout d'abord que le R^2 multiple est largement supérieur à celui du modèle sans données d'expérience (21%) avec une p-value du modèle significativement faible (Tableau 4.9). Ainsi, le meilleur modèle à prendre est le deuxième modèle avec données d'expérience et base de données réduite.

Une analyse de résidus a été effectuée, on a trouvé que les résidus suivent la loi normale, le P-plot des résidus est en Annexe B.

Tableau 4.9 : Résultats du test du modèle de régression avec base de données réduite avec données d'expérience

Dependent Variable	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (données12.sta)										
	Multiple R	Multiple R^2	Adjusted R^2	SS Model	df Model	MS Model	SS Residual	df Residual	MS Residual	F	p
Somme	0,463969	0,215267	0,092171	289,6587	16	18,10367	1055,921	102	10,35217	1,748781	0,049101

Le tableau 4.10 représente les valeurs des coefficients correspondants à chaque modalité de facteur. Les modalités avec signes négatifs contribuent à la diminution du rang de l'accident par rapport aux modalités de référence. La prévention ou l'évitement de l'accident est moins couteux et moins compliqué par rapport à celui se produisant avec les modalités de référence. L'importance de ces résultats réside non seulement dans la prédiction du rang d'accident pour une combinaison donnée de modalités, mais aussi dans la comparaison avec les résultats de la régression logistique.

Lorsqu'une modalité augmente la sévérité de l'accident pour la régression logistique, mais en même temps elle diminue le rang de l'accident, alors intervenir sur cette modalité devient prioritaire puisque la sévérité de l'accident devient plus grande. Cependant, prévenir ou éliminer l'accident reste plus simple.

Tableau 4.10 : Estimation des paramètres du modèle de régression linéaire utilisant la base de données réduite avec données d'expérience.

Effect	**Level of Effect**	**Column**	**Rang Param**	**Rang Std.Err**	**Rang p**
Intercept		1	9,64453	0,675550	0,000000
Experience		2	-0,00444	0,002330	0,059821
Saison	Hiver	3	0,05918	0,313968	0,850859
Activité	Exploitation	4	0,19956	0,374982	0,595749
Quart de travail	Jour	5	-0,25773	0,499583	0,607049
Quart de travail	Soir	6	0,44446	0,526087	0,400174
Secteur d'activité	Adm pub-autres	7	0,30993	0,688362	0,653487
Secteur d'activité	Commerce	8	-2,38842	1,197974	0,048853
Secteur d'activité	Agriculture	9	1,18777	0,924188	0,201633
Secteur d'activité	Mines	10	-0,04719	1,016983	0,963078
Secteur d'activité	Transport et entrepo	11	-0,42533	0,839768	0,613609

Tableau 4.10 : Estimation des paramètres du modèle de régression linéaire utilisant la base de données réduite avec données d'expérience (Suite et fin).

Secteur d'activité	Forestier	12	0,13852	0,776054	0,858690
Categorie d'équiement	Forestier et agriculture	13	-1,81625	0,776712	0,021319
Categorie d'équiement	Transport divers	14	0,66908	0,669965	0,320317
Categorie d'équiement	Transport routier	15	0,55527	0,573114	0,334902
Énergie	Mecanique	16	-1,08958	0,537216	0,045147
Énergie	Gravite	17	-0,41504	0,510522	0,418128

$$\begin{aligned} Rang = \; & 9,64 - 0,004Exp + 0,05hiv + 0,199Exploi - 0,25Jr \\ & + 0,44Sr + 0,30AdmA - 2,38Com + 1,18Agr - 0,04Min \\ & - 0,42TranE + 0.13Fores - 1,81ForesA + 0,66TransD \\ & + 0.55TransR - 1,08Mec - 0,41Grav \end{aligned}$$

Exemple :

En comparant les résultats des deux modèles pour les modalités « mines » et « agriculture » du facteur « secteur », nous remarquons qu'un accident a 4,3 fois plus de chance d'être mortel par rapport à un accident dans le secteur de l'agriculture selon le modèle de la régression logistique. En revanche, le coefficient estimé de la modalité « mines » est de -0,04 alors que pour l'agriculture il est de 1,18. La modalité agriculture élève le rang de l'accident.

Cette comparaison nous permet de déduire qu'un accident dans le secteur des mines est plus sévère par rapport à un accident en agriculture. Toutefois, il est moins difficile à prévenir ou à éviter.

4.5 Modèle d'Analyse logique des données

L'analyse logique des données ou *logical analysis of data* (LAD) est une technique supervisée de classification et de génération de *pattern*. Il s'agit d'une technique booléenne qui permet d'identifier les causes de certains évènements en examinant un ensemble de facteurs représentant toutes les causes possibles de ces évènements. LAD est utilisé également dans plusieurs problèmes de classification où elle a démontré une précision comparable ou meilleure que les autres techniques de classification (Ragab et al., 2014).

Pour notre cas, nous allons utiliser cette technique pour trouver les règles menant à un accident mortel ou grave en examinant les facteurs : saison, activité, secteur, catégorie et énergie.

4.5.1 Préparation des données

Le logiciel Weka a été utilisé pour la recherche des règles de classification. Une codification de la sortie et des modalités de chaque facteur a été effectuée comme suit :

- **Sortie :** Accident mortel (1), Accident grave non mortels (0) ;
- **Saison :** Été (1), Hiver (2) ;
- **Activité :** Maintenance (1), Exploitation (2) ;
- **Quart de travail :** Jour (1), Soir (2), Nuit (3) ;
- **Secteur d'activité :** Administration publique-autres services commerciaux et personnels (1), Commerce (2), Agriculture (3), Mines (4), Transport et entreposage (5), Forestier (6), Construction (7) ;
- **Catégorie d'équipement :** Forestier et agricole (1), Transport divers (2), Transport routier (3), Travaux de construction et voirie (4) ;
- **Énergie :** Mécanique (1), Gravité (2), Chimique ou électrique (3).

4.5.2 Résultats

Le tableau 4.11 présente les règles de classification des accidents graves et mortels.

Tableau 4.11 : Règles retenues de classification des accidents graves et mortels

@ Positive patterns	**@ Négative patterns**
- [Énergie > 2.5] [activité <= 1.5] [secteur > 1.5] [secteur <= 6.5] - [Énergie > 2.5] [activité <= 1.5] [secteur > 3.5] [quart <= 1.5] - [Énergie > 2.5] [secteur > 3.5] [secteur <= 6.5] [catégorie <= 3.5] [saison <= 1.5] - [Énergie > 2.5] [secteur > 1.5] [activité <= 1.5] [saison > 1.5] # Total : 4 positive patterns	- [Secteur > 6.5] - [Secteur > 6.5] [catégorie <= 3.5] - [Énergie <= 1.5] [secteur > 2.5] [quart > 2.5] - [Secteur > 4.5] [secteur > 6.5] - [Secteur > 4.5] [secteur > 6.5] [énergie <= 1.5] - [Secteur > 5.5] [quart > 2.5] - [Secteur > 1.5] [secteur <= 3.5] - [Secteur > 1.5] [secteur <= 3.5] [quart <= 1.5] - [Catégorie <= 2.5] - [Catégorie <= 2.5] [énergie > 1.5] - [Catégorie <= 2.5] [quart > 2.5] - [Secteur > 5.5] [secteur > 6.5] - [Secteur > 5.5] [secteur > 6.5] [quart > 1.5] - [Catégorie <= 1.5] [secteur <= 1.5] - [Secteur > 6.5] [énergie <= 1.5] - [Catégorie <= 2.5] [secteur > 4.5] - [Catégorie <= 2.5] [secteur > 4.5] [énergie > 1.5] - [Catégorie <= 1.5] [secteur <= 2.5] - [Catégorie <= 1.5] [quart <= 2.5] [secteur <= 2.5] - # Total : 19 negative patterns

4.5.3 Interprétation des résultats

Le premier bloc des patterns (*positive patterns*) représente les patterns conduisant à un accident grave non mortel. Mais puisque le pourcentage des accidents graves est relativement faible par rapport à celui des accidents mortels, le degré de pureté des patterns est faible ; or on ne les a pas pris en considération. Le deuxième bloc (*negative patterns*) représente les règles spécifiques aux accidents mortels. Parfois, nous trouvons des règles partiellement redondantes ou avec des

intersections. De ce fait, seules les règles interprétables non redondantes sont prises en considérations.

La première règle [secteur > 6.5] correspond au secteur d'activité construction et travaux publics, ce secteur recouvre une grande partie des accidents mortels.

La deuxième règle [secteur > 6.5] [catégorie <= 3.5] correspond à une association entre le secteur de construction et travaux publics et l'utilisation des équipements de catégorie Transport routier. Cette règle explique parfaitement le grand nombre d'accidents causés par les camions dans les chantiers de construction. La revue de la littérature appuie ce résultat.

La troisième règle [Énergie <= 1.5] [secteur > 2.5] [quart > 2.5] correspond à une association entre l'énergie mécanique (déplacement d'équipement) avec la majorité des secteurs d'activité (Mines, transport et entreposage, forestier, construction) et le quart de nuit. La liaison est clair entre cette règle et les problèmes de visibilité, de fatigue et de manque de supervision pour le quart de nuit.

La quatrième règle [Secteur > 4.5] [secteur > 6.5] [énergie <= 1.5] correspond à l'association entre le secteur de construction et l'énergie mécanique, c'est-à-dire les accidents de type (équipement en mouvement).

La cinquième règle [Secteur > 1.5] [secteur <= 3.5] [quart <= 1.5] correspond à l'association entre le secteur commerce et le quart de travail de jour. Toutes les observations du secteur d'activité commerce correspondent à des décès, d'ailleurs c'est ce qui a causé le problème de séparation complète lors de l'ajustement du modèle de régression logistique, on ne pourra pas affirmer que le secteur d'activité *commerce* est hautement risqué puisque ce résultat pourrait être due à la taille de l'échantillon étudié

La sixième règle [Catégorie <= 2.5], [Catégorie <= 2.5] [énergie > 1.5], [Catégorie <= 2.5] [quart > 2.5] concerne les équipements de catégorie agricole, forestier ou transport divers recouvrant une grande partie des décès, surtout s'ils sont liés à des chutes d'équipement de charge ou d'accidenté, et le quart de travail de nuit.

La septième règle [Catégorie <= 1.5] [secteur <= 1.5] correspond à l'association entre un équipement forestier et agricole avec le secteur (autres services commerciaux et personnels), sachant que ce secteur comprend le garage d'entretien et de réparation, on peut déduire qu'il s'agit de l'entretien des équipements de type agricole et forestier qui conduit à des accidents mortels.

La huitième règle [Secteur > 6.5] [énergie <= 1.5] correspond à l'association entre le secteur de la construction et l'énergie mécanique, c'est-à-dire les accidents survenant dans le secteur de la construction par déplacement d'équipement ou mouvement de pièces d'équipement.

La neuvième règle [Catégorie <= 2.5] [secteur > 4.5], [Catégorie <= 2.5] [secteur > 4.5] [énergie > 1.5] correspond à l'association entre les catégories d'équipement transport divers et forestier et les secteurs de transport, entreposage et exploitation forestière surtout si l'accident est causé par une chute d'équipement, de charge ou de l'accidenté.

Le reste des règles comporte des redondances avec les règles déjà interprétées. Cette méthode nous a permis de comprendre non seulement le rôle de chaque facteur pris individuellement, mais aussi l'effet que peut avoir l'association de plusieurs modalités de facteurs. Par exemple, le facteur *quart de travail*, n'était pas trop significatif dans les deux modèles de régression. Cependant, le fait d'associer la modalité *nuit* avec la plupart des secteurs d'activité caractérise les accidents mortels. Donc, l'effet d'un facteur, qui est statistiquement non significatif, pourrait être amplifié par association avec d'autres facteurs. Les résultats de cette méthode devraient être considérés comme complémentaires aux résultats obtenus par les techniques de régression précédemment utilisées.

Par ailleurs, nous avons calculé les probabilités d'avoir une combinaison de facteurs définie par une règle donnée. Ces probabilités sont obtenues par la multiplication des probabilités des facteurs constituant la règle. Le tableau 4.12 donne ces probabilités pour toutes les règles retenues précédemment.

Tableau 4.12 : Règles retenues de classification des accidents graves et mortels

Règles retenues	**Probabilités**
• [secteur > 6.5]	0.27
• [secteur > 6.5] [catégorie <= 3.5]	0.10
• [Énergie <= 1.5] [secteur > 2.5] [quart > 2.5]	0.02
• [Secteur > 4.5] [secteur > 6.5] [énergie <= 1.5]	0.10
• [Secteur > 1.5] [secteur <= 3.5] [quart <= 1.5]	0.49
• [Catégorie <= 2.5], • [Catégorie <= 2.5] [énergie > 1.5] • [Catégorie <= 2.5] [quart > 2.5]	0.31 0.17 0.01
• [Catégorie <= 1.5] [secteur <= 1.5]	0.007
• [Secteur > 6.5] [énergie <= 1.5]	0.10
• [Catégorie <= 2.5] [secteur > 4.5] • [Catégorie <= 2.5] [secteur > 4.5] [énergie > 1.5]	0.13 0.07

4.6 Modèle de risque proportionnel de Cox

Le modèle de risque proportionnel de Cox est un des modèles de survie proposé par Cox en 1972. Ce modèle exprime la fonction de taux de défaillance comme suit :

$$\lambda(t,x) = \lambda_0(t)e^{\beta x}$$

Avec $\beta = (\beta_1,\ldots.\beta_n)$ un vecteur de paramètres et $\lambda_0(t)$ la fonction de risque de base.

Le modèle de Cox semi-paramétrique $e^{\beta x}$ permet de calculer le rapport de risque (Hazard ratio) pour deux individus avec deux combinaisons de facteurs différentes. Il permet également de calculer le taux de défaillance (accident) pour un individu à un instant t. Le taux de défaillance se définit comme étant la probabilité conditionnelle d'avoir un accident au moment $t + \Delta t$ sachant qu'au moment t l'accidenté était sain.

4.6.1 Préparation des données

Pour ce modèle, nous avons considéré les accidents mortels comme données complètes et les accidents graves comme données censurées. Avant d'ajuster le modèle, il faut tout d'abord déterminer les modalités de références pour chaque facteur (Tableau 4.13). Pour se faire, les résultats de la régression logistique sont exploités en prenant la modalité de référence de chaque facteur qui correspond au plus bas risque d'avoir un accident mortel.

Tableau 4.13 : La modalité de références pour chaque facteur

Facteur	**Références**
Saison	Été
Activité	Exploitation
Quart	Jour
Catégorie d'équipement	Construction et voirie
Secteur d'activité	Agriculture

Le tableau 4.14 présente des valeurs estimées des paramètres ainsi que les taux de défaillance pour chaque modalité de facteur par rapport à la modalité de référence à chaque instant t.

Tableau 4.14 : Valeurs des rapports de risque ainsi que les valeurs estimées des paramètres du modèle de Cox

Modalités des facteurs	Level of Effect	Parameter Estimate	Standard Error	P value	Hazard Ratio
Saison	Hiver	-0,017337	0,110468	0,875289	0,965920
Activité	Maintenance	0,048464	0,130813	0,711021	0.907621
Quart de travail	Soir	0,038584	0,187748	0,837174	1,212004
Quart de travail	Nuit	0,115107	0,259498	0,657350	1,308391
Secteur d'activité	Adm pub-autres	-0,364456	0,238341	0,126230	0,890926
Secteur d'activité	Commerce	0,613418	0,385705	0,111749	2,494075
Secteur d'activité	Mines	0,051538	0,330705	0,876156	1,408265
Secteur d'activité	Transport et entrepo	-0,009680	0,295497	0,973868	1,547070
Secteur d'activité	Forestier	0,155222	0,270447	0,566006	1,392220
Secteur d'activité	Construction	-0,270364	0,253787	0,286731	0,909658
Categorie d'équiement	Forestier et agriculture	0,096855	0,257593	0,706916	1,496453
Categorie d'équiement	Transport divers	0,209387	0,211267	0,321636	1,262585
Categorie d'équiement	Transport routier	-0,282468	0,212409	0,183574	0,772059

Pour vérifier la proportionnalité du risque, le test le Schönefeld a été effectué. D'après les résultats obtenus, nous pourrions affirmer que, généralement, l'hypothèse de proportionnalité du risque pourrait être acceptée. L'Annexe C présente les graphes de test de Schönefeld.

4.6.2 Analyse des résultats

Rapports de risque

La colonne « parameter estimate » contient les valeurs estimées des paramètres de la partie non paramétrique du modèle de Cox. La dernière colonne « Hazard Ratio » représente les valeurs du taux de risque pour chaque modalité par rapport à la modalité de références. Nous remarquons que :

- Le taux de risque diminue de 4% en hiver par rapport à l'été ;
- Le taux de risque augmente de 10% pour l'exploitation par rapport à la maintenance ;
- Le taux de risque augmente respectivement de 21% et de 30% pour le soir et la nuit par rapport au jour ;
- Le taux de de risque augmente respectivement de 49% et de 26% pour les équipements de l'agriculture, de l'exploitation forestière et de transport divers par rapport aux équipements

de construction et voirie, par contre ce taux diminue de 30% pour les équipements de transport routier.

Le taux de défaillance augmente respectivement de 249%, 40%, 54%, 39% pour les secteurs du commerce, des mines, du transport et entreposage et forestier par rapport au secteur de l'agriculture, mais diminue respectivement de 12% et 11% pour les secteurs autres services personnels et commerciaux et de construction.

On remarque des contradictions entre les résultats obtenus ici et les résultats obtenus par le modèle de la régression logistique. Ce fait s'explique par la probabilité mesurée. Pour la régression logistique, l'objectif était de calculer la probabilité d'avoir un accident mortel ou grave, c'est-à-dire la probabilité d'un degré de sévérité. Ici, on calcule la probabilité d'avoir un accident, peu importe sa sévérité, à moment $t+\Delta t$ sachant qu'il n'y avait pas d'accident au moment t.

Le modèle de Cox

Le modèle de Cox permet non seulement de calculer le rapport de taux de défaillance pour deux individus avec deux combinaisons de facteurs différentes, mais aussi de calculer le taux de défaillance instantané pour un individu à un moment t.

Pour se faire, nous avons besoin de déterminer le taux de défaillance de base $\lambda_0(t)$. Le modèle de Weibull à 2 paramètres β (forme) et η (échelle) est choisi. Ce modèle est qualifié de polyvalent, flexible et facile à interpréter. Ainsi, la fonction de taux de risque de Weibull est donnée par :

$$\lambda_0(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{1-\beta}$$

Les données de survie (expérience), le moment de l'accident ainsi que les données de la censure ont été utilisées pour estimer les paramètres du modèle de Weibull. Les valeurs estimées de β et η sont les suivantes :

- $\beta = 0{,}69$
- $\eta = 125{,}5$ mois

Nous constatons que la valeur estimée de facteur de forme β est inférieur à 1. Cela veut dire que le taux de défaillance en absence des facteurs influant, diminue avec l'expérience des travailleurs. Ce qui est plausible.

4.7 Discussion de l'analyse quantitative

Les avantages des méthodes statistiques ou de *data mining* pour la compréhension et l'analyse des accidents sont nombreux. Toutefois, elles nécessitent des données de qualité et de quantité satisfaisantes.

Les résultats obtenus avec chaque méthode sont complémentaires. Ainsi, une lecture d'ensemble des résultats est préférable pour une meilleure compréhension des circonstances des accidents causés par les machines mobiles. Cela n'empêche toutefois pas que chaque méthode prise individuellement soit efficace pour avoir de l'information utile selon les données disponibles et les résultats voulus.

Dans cette analyse quantitative des données d'accidents, les quatre méthodes présentées ne représentent pas toutes les techniques utiles pour traiter les données relatives aux données d'accidents, mais plutôt les techniques utilisables vu la nature de nos données.

Plusieurs difficultés ont été rencontrées lors de la manipulation de nos données :

- La quantité : bien que l'analyse de plus de 300 rapports d'accident pour en extraire de l'information soit déjà une tache longue et laborieuse, avoir accès à une plus grande base de données avec plus d'information permettrait d'avoir un meilleur ajustement des modèles de régression ;
- Le non-équilibre : pour la base de données avec laquelle nous avons travaillé, les décès représentent plus de 90% des cas, contre moins de 10% pour les accidents graves. Un tel déséquilibre altère négativement les résultats du modèle de régression logistique et de l'analyse logistique des données (LAD). Des données mieux équilibrées pourraient augmenter la puissance prédictive des modèles de régression logistique et des règles générées par la technique LAD ;
- Un modèle de régression logistique multinomiale avec plusieurs degrés de sévérité aurait été plus intéressant en termes de prédiction. Avoir juste un degré de sévérité rapproché diminue significativement la qualité des résultats obtenus. Une telle diversité dans la sortie aurait permis l'utilisation d'autres techniques telles que l'analyse de correspondance multiple ou les arbres de décision ;

- Un modèle de régression logistique binaire, mais avec deux degrés de sévérité éloignés (accident avec blessure mineure vs accident grave ou mortel) aurait été plus intéressant puisque l'état de référence correspond à un risque réellement bas ;
- Pour la régression multiple, une sortie continue mesurable comme le nombre de jours indemnisés ou le montant de débours par accident représenteraient la meilleure sortie à prédire.

CHAPITRE 5 CONCLUSION

L'objectif de ce travail était de mieux comprendre des accidents engendrés par les machines mobiles en déterminant les causes principales et les circonstances favorisant leur survenance.

Une première partie consistait à l'analyse manuelle des rapports d'accident de la CNESST qui nous a permis d'avoir une vision claire sur l'importance des pertes humaines et financières entraînées par ce type d'accidents. Elle nous a permis également de repérer les causes les plus récurrentes des accidents ainsi que les facteurs augmentant le risque tels que les secteurs les plus à risque et les équipements les plus dangereux.

Les résultats de la première partie d'analyse pourraient représenter un point de départ pour des études plus spécifiques et plus approfondies concernant :

- Un secteur d'activité précis ;
- Un type d'équipement donné ;
- Un problème technique plus spécifique aux machines mobiles ;

La concentration sur un axe permettra de mieux cerner les causes des accidents et par conséquent des solution plus spécifiques et mieux adaptées pourront être proposées.

La deuxième partie d'analyse était consacrée à l'exploitation de certaines techniques quantitatives de modélisation statistique et de fouille de données pour :

- Vérifier l'applicabilité de ces techniques sur les données d'accidents ;
- Quantifier le risque d'accident pour une combinaison donnée de facteurs ;
- Quantifier la sévérité d'accident pour une combinaison donnée de facteurs ;
- Déterminer les règles ou les associations de facteurs menant aux accidents ;
- Quantifier le taux de défaillance pour des combinaisons différentes de facteurs ;
- Quantifier le taux de défaillance pour un individu à un instant t pour en fonction d'une combinaison donnée des facteurs.

Les résultats obtenus par les quatre techniques sont perfectibles dans la mesure où un accès à de meilleures données d'accidents, en quantité et en qualité, serait possible, telles que : le nombre de

jours indemnisés par accident, les montant des débours, l'âge des accidentés, l'expérience des accidentés, plus de clarté concernant la qualification et la formation des accidentés. De plus, l'utilisation d'autres technique de quantification et de prédiction seraient possibles.

Comme perspectives :

- À partir de la liste de vérification proposée, il est tout à fait envisageable de transformer cette liste en un outil d'estimation du risque en reliant la probabilité de réalisation de chaque point (oui ou non) avec le dommage qui lui est afférent ;
- Comme chacune des techniques propose une classification des facteurs par ordre d'importance selon les valeurs des paramètres du chaque modèle, il est tout à fait possible de tester l'équivalence statistique de ces importances à l'aide du test de Friedman par exemple ;
- Enfin, il serait possible de déterminer la période optimale de formation ou de sensibilisation des travailleurs en fonction des seuils de probabilité d'accidents acceptables et les coûts d'accidents et de formation.

RÉFÉRENCES

ANSI Z245.1-2012, 2012 :Mobile Wastes and Recyclable Materials Collection, Transportation, and Compaction Equipment - Safety Requirements. American National Standard Institute

Beavers JE, Moore JR, Rinehart R, Schriver WR. Crane-related fatalities in the construction industry. Journal of Construction Engineering and Management. 2006 Sep;132(9):901-10.

Caffaro F, Cavallo E. Comprehension of safety pictograms affixed to agricultural machinery: a survey of users. Journal of safety research. 2015 Dec 31;55:151-8.

Canadian agricultural injury reporting. «Agricultural fatalities in Canada», 1990-2008. Winnipeg, Manitoba . 2011.

CEN/TR 614-3:2011, 2011: Ergonomic Principles for the Design of Mobile Machinery, The European Committee for Standardization.

Cheng, C. W., Leu, S. S., Cheng, Y. M., Wu, T. C., & Lin, C. C. (2012). Applying data mining techniques to explore factors contributing to occupational injuries in Taiwan's construction industry. *Accident Analysis & Prevention*, *48*, 214-222.

Cheng, C. W., Lin, C. C., & Leu, S. S. (2010). Use of association rules to explore cause–effect relationships in occupational accidents in the Taiwan construction industry. *Safety science*, *48*(4), 436-444.

Chinniah Y. Analysis and prevention of serious and fatal accidents related to moving parts of machinery. Safety science. 2015 Jun 30;75:163-73.

CNESST, 2016. [En ligne]. Available: http://www.centredoc.csst.qc.ca/zones/. [Accès le 2015].

CNESST, Typologie des risque en santé et en securité du travail, 2011.

Collins JW, Landen DD, Kisner SM, Johnston JJ, Chin SF, Kennedy RD. Fatal Occupational Injuries Associated With Forklifts, United States, 1980ą1994. American journal of industrial medicine. 1999;36:504ą512.

Collins JW, Smith GS, Baker SP, Landsittel DP, Warner M. A case-control study of forklift and other powered industrial vehicle incidents. American journal of industrial medicine. 1999 Nov 1;36(5):522-31.

Communication personnelle , Activité de recherche IRSST 2013-0082, 2014.

CPSSTQ, « Qui dit accident dit enquete et analyse » *Convergence,* pp. 5-6, Mai 2004.

CSA B335-15 : Safety standard for lift trucks ,Canadian standards association.

CSA Z460-13, 2013, Control of hazardous energy - Lockout and other methods, Canadian standards association

DeGroot JM, Isaacs C, Pickett W, Brison RJ. Patterns of fatal machine rollovers in Canadian agriculture. Chronic diseases and injuries in Canada. 2011 Jun 1;31(3).

DIRECTIVE 2006/42/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on machinery, and amending Directive 95/16/EC ,Official Journal of the European Union, 17 May 2006.

FACTS «Les avantages pour l'entreprise d'une bonne sécurité et d'une bonne santé au travail,»,*Agence européenne pour la sécurité et la santé au travail,* 2008 ,ISSN 1681-2131.

Folkard, S., & Tucker, P. (2003). Shift work, safety and productivity. *Occupational medicine*, *53*(2), 95-101.

Franklin RC, Mitchell RJ, Driscoll TR, Fragar LJ. Agricultural work–related fatalities in Australia, 1989–1992. Journal of agricultural safety and health. 2001;7(4):213.

Hartling L, Pickett W, Dorland J, Brison RJ. Hospital costs associated with agricultural machinery injuries in Ontario. American journal of industrial medicine. 1997 Nov 1;32(5):502-9.

Helmer G. 1994. Fatalities involving forklifts and other powered industrial carriers, 1991±92. Fatal Workplace Injuries in 1992: A Collection of Data and Analysis, U.S. Department of Labor, Report 870.

Hinze JW, Teizer J. Visibility-related fatalities related to construction equipment. Safety science. 2011 Jun 30;49(5):709-18

Homce GT, Cawley JC, Yenchek MR, Sacks HK. An alarm to warn of overhead power line contact by mobile equipment. In Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE 2001 Sep 30 (Vol. 2, pp. 1376-1383). IEEE.

Kecojevic V, Radomsky M. The causes and control of loader- and truck-related fatalities in surface mining operations. Injury control and safety promotion. 2004 Dec 1;11(4):239-51.

Kumar R, Ghosh AK. The accident analysis of mobile mine machinery in Indian opencast coal mines. International journal of injury control and safety promotion. 2014 Mar 1;21(1):54-60.

McCann, «Heavy equipment and truck-related deaths on excavation work sites,» *Journal of safety research*, 2006.

Marsh SM, Fosbroke DE. Trends of occupational fatalities involving machines, United States, 1992–2010. American journal of industrial medicine. 2015 Nov 1;58(11):1160-73.

McCann M, Cheng MT. Dump truck-related deaths in construction, 1992–2007. American journal of industrial medicine. 2012 May 1;55(5):450-7.

Mobile machine lockout: safety meeting topics. Videocassette et guides, North Bay: ASTIFO, 2004.

Ore T, Fosbroke DE. Motor vehicle fatalities in the United States construction industry. Accident Analysis & Prevention. 1997 Sep 30;29(5):613-26.

Pratt SG, Kisner SM, Helmkamp JC. Machinery-related occupational fatalities in the United States, 1980 to 1989. Journal of Occupational and Environmental Medicine. 1996 Jan 1;38(1):70-6.

Preventing gear - pedestrian collisions, Place of detection devices and visual aids, National Research and Safety Institute.

Ragab, A., Ouali, M. S., Yacout, S., & Osman, H. (2014, January). Condition-Based Maintenance Prognostics Using Logical Analysis of Data. In *IIE Annual Conference. Proceedings* (p. 378). Institute of Industrial Engineers-Publisher.

RSST «Le reglement sur la santé et la securité du travail du Québec ,2014».

Services Quebec-Entreprise 2016. [En ligne]. Available: https://www2.gouv.qc.ca/entreprises/portail/quebec/popupgrand?x=aideSecteursActivites#agriculture. [Accès le 10 10 2016].

Swartz G. Forklift tipover: A detailed analysis. Professional Safety. 1998 Jan 1;43(1):20.

T. Thomas, «10 essentials of mobile equipment safety,» Canadian occupational safety, 2012. [En ligne]. Available: http://www.cos-mag.com/hygiene/hygiene-stories/10-essentials-of-mobile-equipment-safety.html. [Accès le 2015].

Teizer J, Allread BS, Fullerton CE, Hinze J. Autonomous pro-active real-time construction worker and equipment operator proximity safety alert system. Automation in Construction. 2010 Aug 31;19(5):630-40.

Teizer J, Allread BS, Mantripragada U. Automating the blind spot measurement of construction equipment. Automation in Construction. 2010 Jul 31;19(4):491-501.

Thelin A. Fatal accidents in Swedish farming and forestry, 1988–1997. Safety science. 2002 Aug 31;40(6):501-17.

Tseng, W. S., Nguyen, H., Liebowitz, J., & Agresti, W. (2005). Distractions and motor vehicle accidents: Data mining application on fatality analysis reporting system (FARS) data files. *Industrial Management & Data Systems*, *105*(9), 1188-1205.

ANNEXE A - NOMBRE DE LÉSIONS, JOURS INDEMNISÉS ET MONTANTS DE DÉBOURS PAR GENRE D'ACCIDENT

Tableau A.1 Nombre de lésions, jours indemnisés et montants de débours par genre d'accident

Genre d'accident ou d'exposition (code et description)	Lésions		Jours indemnisés		Débours totaux ($)	
	N	%	N	%	N	%
30000 - Machines, n.p.	397	20,8	33 606,8	18,2	3 560 022	18,1
82500 - Camion, n.p.	237	12,4	25 710,2	13,9	2 733 777	13,9
85100 - Chariot élevateur à fourche, n.p.	192	10,1	13 965,2	7,6	1 475 433	7,5
85120 - Chariot élevat. fourche, à main, conducteur porte, motorisé	188	9,9	14 329,8	7,8	1 437 809	7,3
82590 - Camion, n.c.a.	128	6,7	13 511,9	7,3	1 455 208	7,4
85190 - Chariot élévateur à fourche, n.c.a.	79	4,1	5 772,6	3,1	522 857	2,7
82540 - Semi-remorque, camion gros porteur & camion à remorque	65	3,4	8 464,0	4,6	931 107	4,7
89000 - Véhicules, n.c.a.	49	2,6	4 823,8	2,6	496 513	2,5
85200 - Chariot industriel mécanique, n.p.	48	2,5	3 244,4	1,8	350 802	1,8
85900 - Véhicule mécanique d'usine ou industriel, n.c.a.	41	2,2	3 869,2	2,1	502 589	2,6
85300 - Tracteur	31	1,6	3 683,4	2,0	395 950	2,0
84100 - Véhicule tout terrain (vtt)	31	1,6	4 830,4	2,6	513 223	2,6
82510 - Camion de livraison	30	1,6	2 908,7	1,6	255 642	1,3
85290 - Chariot industriel mécanique, n.c.a.	28	1,5	1 885,4	1,0	189 424	1,0
84300 - Motoneige	26	1,4	1 972,7	1,1	190 297	1,0
32130 - Pelles à vapeur & pelles mécaniques	23	1,2	3 989,7	2,2	474 717	2,4
82900 - Véhicule routier motorisé, n.c.a.	18	1,0	1 617,0	0,9	170 701	0,9
32540 - Rouleaux compresseurs, finisseurs	18	1,0	1 485,5	0,8	166 066	0,8
85210 - Porte-conteneurs	16	0,8	2 193,6	1,2	192 121	1,0
32110 - Chargeuses-pelleteuses	14	0,7	1 425,8	0,8	167 513	0,9
32430 - Machines à creuser les galeries, les tunnels	13	0,7	4 878,1	2,6	569 310	2,9
39940 - Souffleuses	13	0,7	623,8	0,3	62 702	0,3
82592 - Camion à ordures	12	0,6	1 122,3	0,6	110 716	0,6
88600 - Bateaux autres qu'à voile	12	0,6	1 695,1	0,9	175 664	0,9
31210 - Tondeuses mécaniques, sans conducteur assis	12	0,6	715,8	0,4	61 721	0,3
88200 - Canot, kayak, chaloupe à rames, radeau	12	0,6	681,1	0,4	64 750	0,3

Tableau A.1 Nombre de lésions, jours indemnisés et montants de débours par genre d'accident (Suite)

Genre d'accident ou d'exposition (code et description)	Lésions		Jours indemnisés		Débours totaux($)	
	N	%	N	%	N	%
85150 - Chariot élévateur à plate-forme, petite ou haute levée	11	0,6	714,3	0,4	95 457	0,5
82520 - Camion-benne	9	0,5	1 660,9	0,9	178 125	0,9
32910 - Agitateurs, mélangeurs de terre, minéraux	8	0,4	993,4	0,5	110 285	0,6
82530 - Camionnette	8	0,4	639,1	0,3	95 011	0,5
31230 - Tondeuses-tracteurs	7	0,4	987,3	0,5	76 918	0,4
32200 - Chargeuses, n.p.	7	0,4	817,9	0,4	84 645	0,4
32300 - Machinerie indust. forêt & transform. bois spécialisé n.p.	7	0,4	1 609,4	0,9	228 713	1,2
32390 - Machinerie indust. forêt, transform. bois spécialisé, n.c.a.	7	0,3	1 065,0	0,6	134 068	0,7
85000 - Véhicules mécaniques d'usine ou industriels, n.p.	6	0,3	350,5	0,2	35 175	0,2
31290 - Machines de fauchage, n.c.a.	6	0,3	698,9	0,4	62 542	0,3
84200 - Voiturette de golf automobile	5	0,3	620,5	0,3	59 009	0,3
32140 - Trancheuses (creusage de tranchées)	5	0,3	393,9	0,2	35 379	0,2
84900 - Véhicule tout terrain non industriel, n.c.a.	5	0,3	288,1	0,2	39 081	0,2
85170 - Chargeur à conducteur porte unilatéral	4	0,2	770,9	0,4	69 575	0,4
85160 - Chariot élévateur rétractable	4	0,2	295,0	0,2	28 811	0,1
31220 - Tondeuses à conducteur assis	4	0,2	455,8	0,2	45 896	0,2
32990 - Autres machines construction, mines & outillage forêt, n.c.a	4	0,2	443,8	0,2	49 580	0,3
85240 - Chariots cavaliers	4	0,2	507,4	0,3	45 831	0,2
88700 - Remorqueur, bateau de pêche commerciale	4	0,2	810,9	0,4	70 241	0,4
31990 - Machines agricoles & de jardin, n.c.a.	4	0,2	483,2	0,3	71 546	0,4
39960 - Balayeuses & machines de nettoyage des rues	3	0,2	169,2	0,1	17 839	0,1
31310 - Machines de labour & de travail du sol	3	0,2	135,8	0,1	13 101	0,1
32520 - Niveleuses, lisseuses, dameuses, racleuses	3	0,1	238,3	0,1	23 993	0,1
32590 - Machines de nivellement & de surfacage, n.c.a.	2	0,1	334,4	0,2	29 862	0,2
31330 - Machines d'épandage agricole	2	0,1	271,9	0,1	18 269	0,1

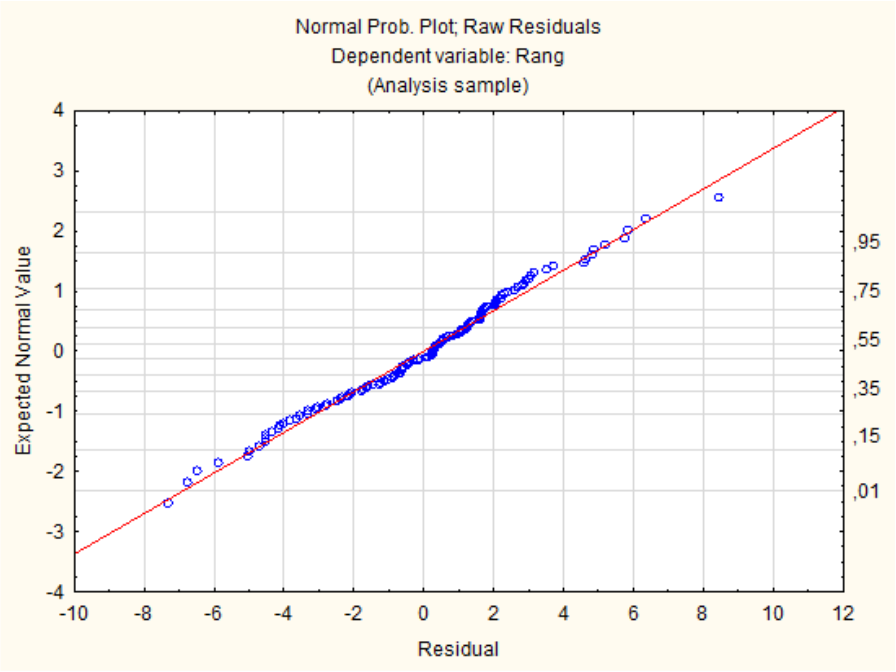
Tableau A.1 Nombre de lésions, jours indemnisés et montants de débours par genre d'accident (Suite)

Genre d'accident ou d'exposition (code et description)	Lésions		Jours indemnisés		Débours totaux ($)	
	N	%	N		N	%
39950 - Chasse-neige	2	0,1	131,0	0,1	15 015	0,1
31900 - Autres machines agricoles & de jardin, n.p.	2	0,1	307,3	0,2	26 218	0,1
34340 - Grues mobiles, grues sur camion, grues sur rail	2	0,1	690,9	0,4	99 872	0,5
32330 - Abatteuses-tronçonneuses, abatteuses-empileuses, feuilles	2	0,1	104,0	0,1	16 395	0,1
32120 - Bulldozers, bouteurs	2	0,1	98,6	0,1	9 422	0,0
32340 - Porteurs-débusqueurs, débusqueurs	2	0,1	364,8	0,2	28 783	0,1
31000 - Machines agricoles & de jardin, n.p.	2	0,1	382,9	0,2	76 187	0,4
32510 - Épandeuses d'asphalte & de mortier	2	0,1	179,9	0,1	16 815	0,1
32410 - Machines de forage, tarières	2	0,1	98,3	0,1	10 831	0,1
87900 - Véhicule ferroviaire, n.c.a.	2	0,1	235,3	0,1	62 221	0,3
82591 - Camion de récupération	2	0,1	348,0	0,2	27 140	0,1
32000 - Machines construction, mines & outillage forêt, n.p.	2	0,1	105,0	0,1	12 322	0,1
31130 - Récolteuses, moissonneuses-batteuses	1	0,1	42,0	0,0	9 269	0,0
32930 - Batteuses de pieux, machines à damer	1	0,1	157,6	0,1	12 982	0,1
88000 - Véhicule nautique, n.p.	1	0,1	51,8	0,0	4 998	0,0
82541 - Camion pour travail forestier, grumiers	1	0,1	156,3	0,1	15 022	0,1
88900 - Véhicule nautique, n.c.a.	1	0,1	368,8	0,2	28 686	0,1
85220 - Porte-billes	1	0,1	157,6	0,1	15 878	0,1
88400 - Bateaux automobiles, yachts	1	0,1	52,4	0,0	8 341	0,0
32100 - Excavateurs, n.p.	1	0,1	109,9	0,1	10 964	0,1
32190 - Excavateurs, n.c.a.	1	0,1	342,0	0,2	35 649	0,2
31110 - Botteleuses	1	0,0	17,7	0,0	3 395	0,0
32490 - Machines d'extraction minière & de forage, n.c.a.	1	0,0	322,9	0,2	38 984	0,2
85230 - Gerbeurs	1	0,0	5,4	0,0	360	0,0
88300 - Motos marines	1	0,0	142,0	0,1	10 553	0,1
82600 - Fourgonnette de tourisme ou de livraison légère	1	0,0	47,8	0,0	3 930	0,0
31190 - Machines de récolte & de battage, n.c.a.	1	0,0	278,3	0,2	20 934	0,1
32420 - Trieurs de minerai, séparateurs, concentrateurs	1	0,0	13,3	0,0	1 034	0,0
32380 - Débusqueurs, câble & grappin	1	0,0	177,2	0,1	19 446	0,1

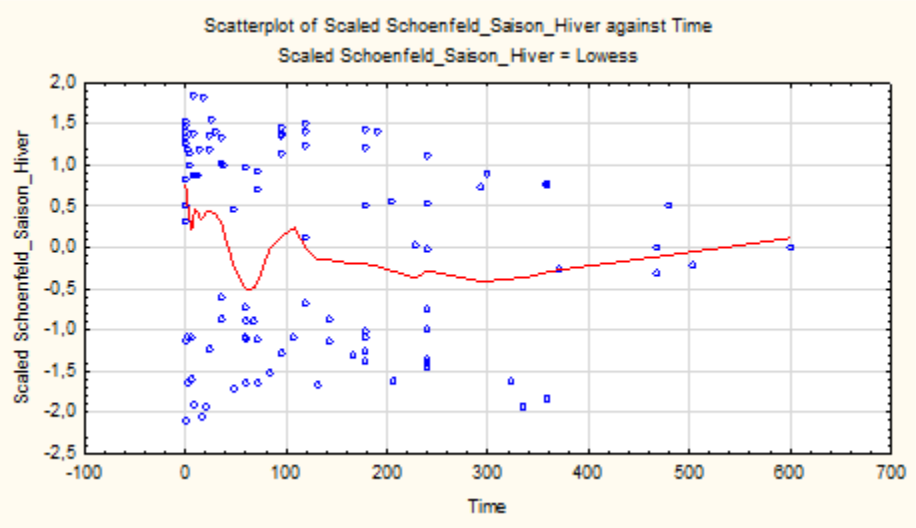
Tableau A.1 Nombre de lésions, jours indemnisés et montants de débours par genre d'accident (Suite et fin)

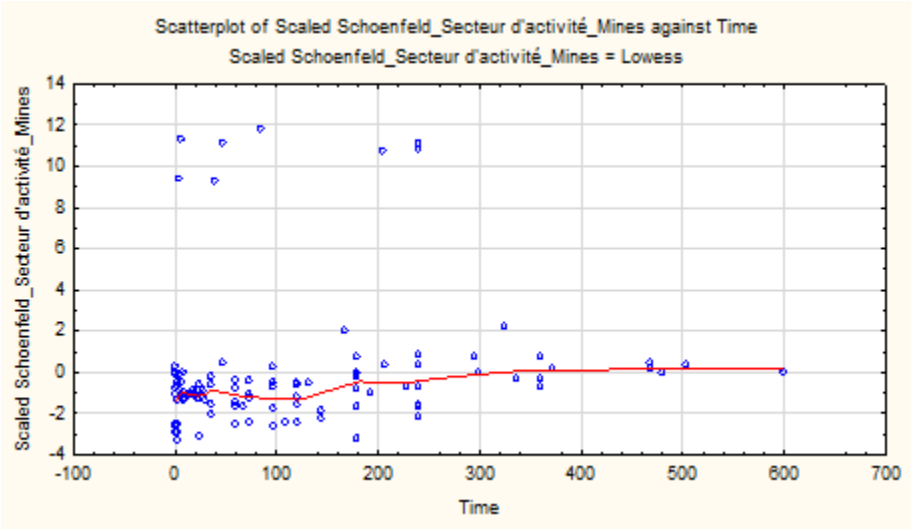
Genre d'accident ou d'exposition (code et description)	**Lésions**		**Jours indemnisés**		**Débours totaux ($)**	
	N	**%**	**N**		**N**	**%**
31390 - Machines de labour, plantation, fertilisation, n.c.a.	1	0,0	232,9	0,1	16 687	0,1
31200 - Machines de fauchage, n.p.	1	0,0	10,7	0,0	965	0,0
32400 - Machines d'extraction minière & de forage, n.p.	1	0,0	27,7	0,0	5 965	0,0
84000 - Véhicule tout terrain non industriel, n.p.	0	0,0	7,4	0,0	286	0,0
88100 - Barge	0	0,0	25,3	0,0	2 856	0,0
31300 - Machines de labour, plantation, fertilisation, n.p.	0	0,0	13,7	0,0	1 194	0,0
85140 - Gerbeur motorisé	0	0,0	23,0	0,0	1 396	0,0
39991 - Matériel de pêche commerciale	0	0,0	148,1	0,1	9 448	0,0
31320 - Machines de plantation des graines	0	0,0	7,7	0,0	424	0,0
32530 - Machines de marquage de chaussée	0	0,0	7,1	0,0	494	0,0
31100 - Machines de récolte & de battage, n.p.	0	0,0	0,1	0,0	62	0,0
32500 - Machines de nivellement & de surfacage, n.p.	0	0,0	2,0	0,0	204	0,0
32360 - Abatteuses-tronçonneuses mécaniques	0	0,0	17,7	0,0	1 265	0,0
31140 - Égreneuses	0	0,0	102,4	0,1	8 944	0,0
Total	1 911	100,0	184 876	100,0	19 637 420	100,0

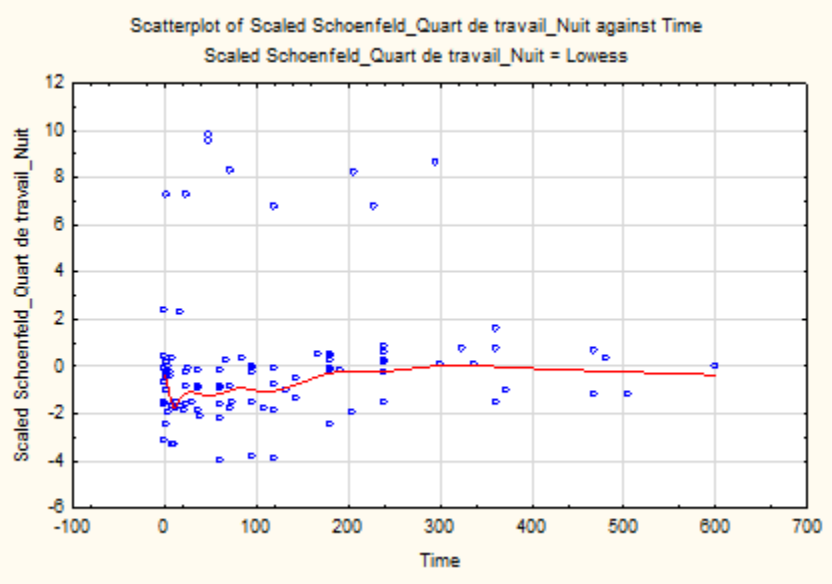
ANNEXE B - LE P-PLOT DES RÉSIDUS POUR LE MODÈLE DE RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE

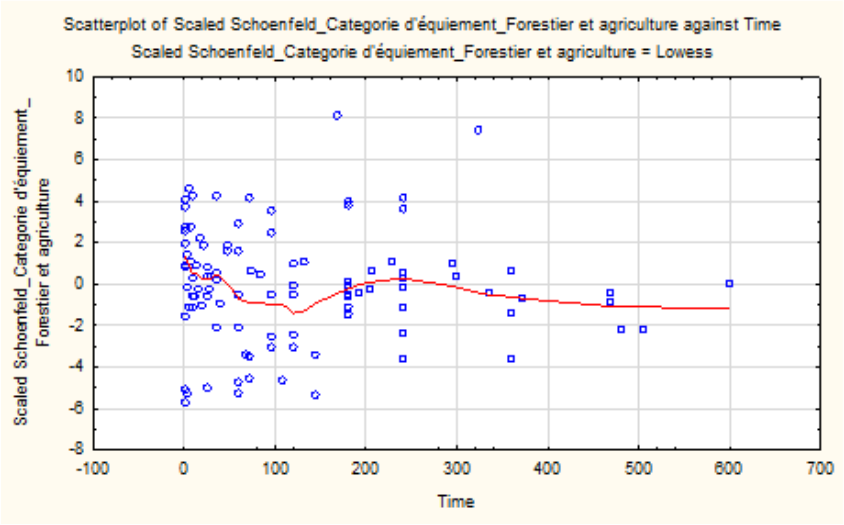


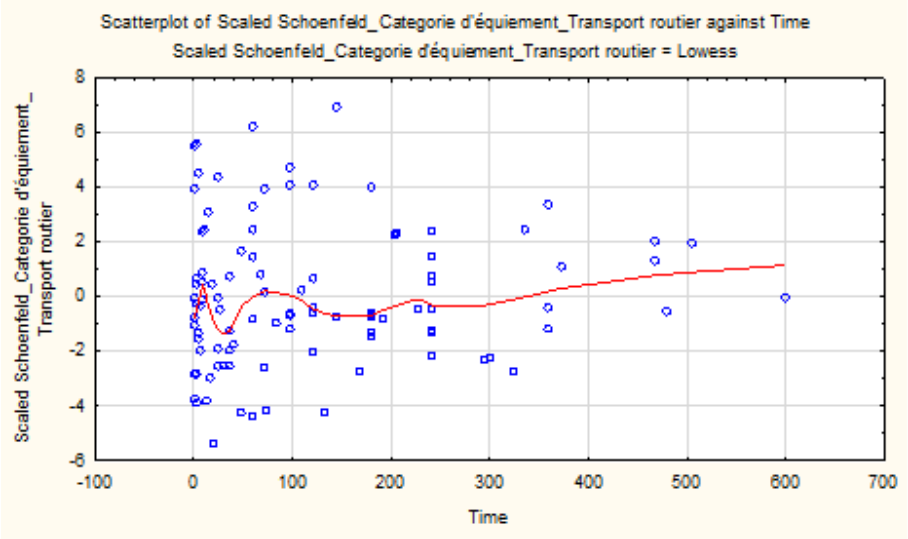
ANNEXE C - LES GRAPHES DE TEST DE SCHÖNEFELD

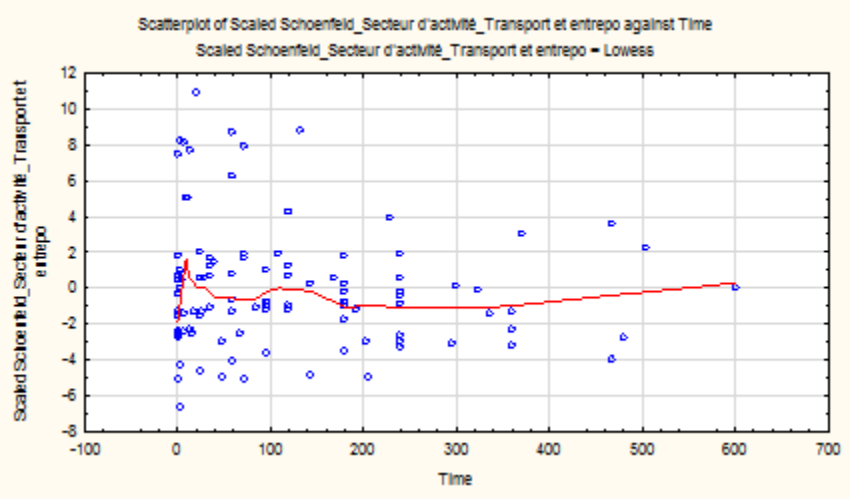


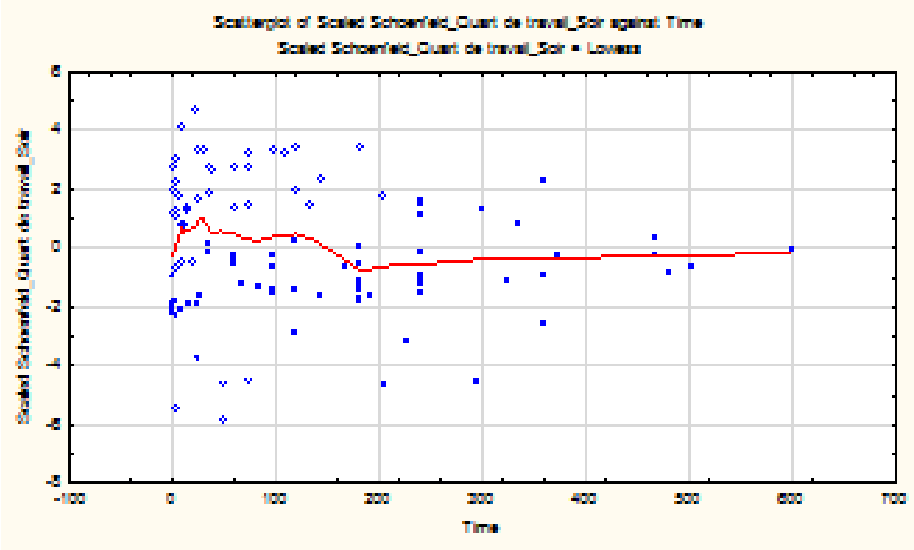


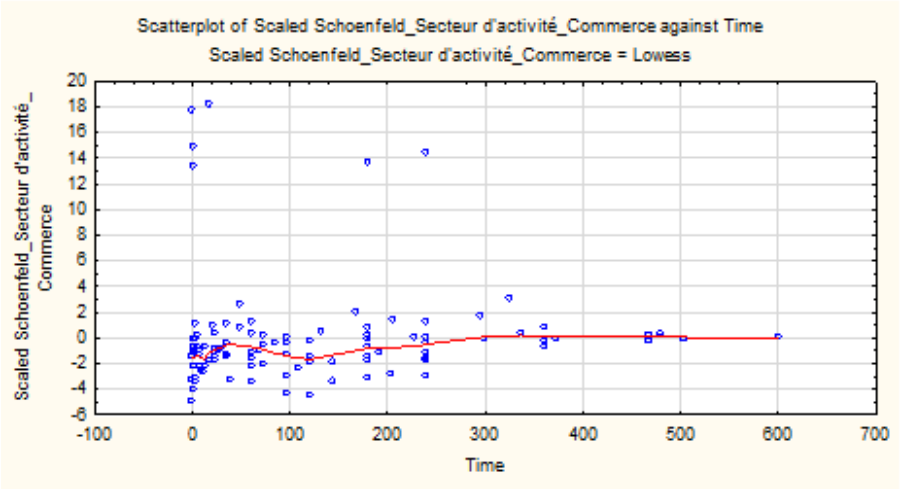

Scatterplot of Scaled Schoenfeld_Quart de travail_Nuit against Time
Scaled Schoenfeld_Quart de travail_Nuit = Lowess
Scaled Schoenfeld_Quart de travail_Nuit
Time


Scatterplot of Scaled Schoenfeld_Categorie d'équiement_Forestier et agriculture against Time
Scaled Schoenfeld_Categorie d'équiement_Forestier et agriculture = Lowess
Scaled Schoenfeld_Categorie d'équiement_ Forestier et agriculture
Time


Scatterplot of Scaled Schoenfeld_Categorie d'équiement_Transport routier against Time
Scaled Schoenfeld_Categorie d'équiement_Transport routier = Lowess
Scaled Schoenfeld_Categorie d'équiement_ Transport routier
Time


Scatterplot of Scaled Schoenfeld_Secteur d'activité_Transport et entrepo against Time
Scaled Schoenfeld_Secteur d'activité_Transport et entrepo = Lowess
Scaled Schoenfeld_Secteur d'activité_Transportet entrepo
Time


Scatterplot of Scaled Schoenfeld_Quart de travail_Soir against Time
Scaled Schoenfeld_Quart de travail_Soir = Lowess
Scaled Schoenfeld_Quart de travail_Soir
Time


Scatterplot of Scaled Schoenfeld_Secteur d'activité_Commerce against Time
Scaled Schoenfeld_Secteur d'activité_Commerce = Lowess
Scaled Schoenfeld_Secteur d'activité_Commerce
Time