

**Modernisation des parachutes
de transporteurs de mines**
Volet 1 – État de l'art

Laurent Giraud, ing.
Bertrand Galy, ing.

RAPPORT D'EXPERTISE
DIFFUSION PUBLIQUE

QR-1156-fr



NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

Mission

Dans l'esprit de la Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST) et de la Loi sur les accidents du travail et les maladies professionnelles (LATMP), la mission de l'IRSST est de :

Contribuer à la santé et à la sécurité des travailleuses et travailleurs par la recherche, l'expertise de ses laboratoires, ainsi que la diffusion et le transfert des connaissances, et ce, dans une perspective de prévention et de retour durables au travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour.
De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST (preventionautravail.com)
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2022
ISBN 978-2-89797-203-5 (PDF)

© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, 2022

IRSST - Direction des communications, de la veille et de la mobilisation des connaissances
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec) H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

Modernisation des parachutes de transporteurs de mines

Volet 1 – État de l’art

Laurent Giraud, ing., Bertrand Galy, ing.

IRSST

RAPPORT D’EXPERTISE
DIFFUSION PUBLIQUE

QR-1156-fr



Avis de non-responsabilité

L’IRSST ne donne aucune garantie relative à l’exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l’information contenue dans ce document.

En aucun cas l’IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l’utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Cette publication est disponible en version PDF sur le site Web de l’IRSST.



NOTE AU LECTEUR

Cette étude a été financée par l’IRSST.

Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

Les résultats des travaux publiés dans ce document n’ont pas fait l’objet d’une évaluation par les pairs.

AVIS DE NON-RESPONSABILITÉ

L’IRSST ne donne aucune garantie relative à l’exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l’information contenue dans ce document. En aucun cas l’IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l’utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Cette expertise a été financée par l’IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

Mise en garde

Cette étude a été réalisée en 2014, il est possible que certains liens et sites Web mentionnés ne soient plus fonctionnels.

REMERCIEMENTS

La préparation de ce rapport a demandé la consultation de nombreuses références et la rencontre de plusieurs personnes que nous tenons à remercier.

Les inspecteurs et professionnels de la CNESST et de CanMet pour leur disponibilité, leur implication dans cette expertise et la volonté de partager leur expérience.

Les inspecteurs miniers spécialisés du Yukon pour les précisions apportées sur les réglementations minières en vigueur dans leur province.

Le personnel du centre de documentation de la CNESST et de l'IRSST pour la recherche bibliographique, et l'aide fournie dans la localisation et l'obtention de certains documents.

Le personnel des mines pour leur accueil lors de nos visites en février et avril 2014.

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Cette étude a été initiée par une lettre datée du 25 octobre 2013 et signée par un membre de la partie syndicale du sous-comité sur les machines d'extraction de la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST)¹. Cette lettre demandait au sous-comité de mandater l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) pour évaluer les systèmes d'arrêt d'urgence des transporteurs de mine en usage à travers le monde (parachutes et autres systèmes), dans le but de moderniser les parachutes exigés sur les transporteurs de mine au Québec. L'écrasement d'un transporteur est subséquent à deux événements dangereux distincts : (i) rupture du câble, et (ii) perte de contrôle du déplacement de la cage sans rupture du câble. Le présent rapport, qui est le volet 1 de ce mandat, présente un état de l'art portant sur les accidents de transporteurs miniers, les câbles d'extraction, les parachutes, les systèmes évitant la perte de contrôle du déplacement de la cage, et la législation relative aux câbles et parachutes à travers le Canada. L'étude des deux événements dangereux précédents constituera respectivement les volets [2](#) et [3](#) de ce mandat.

La majorité des puits de mines souterraines au Canada est équipée de treuils à tambour munis d'un unique câble d'extraction attaché au transporteur. Pour éviter l'écrasement de la cage en cas de rupture du câble, un système parachute est obligatoire. Ce système a été imaginé au milieu du XIX^e siècle par le français Fontaine et un système similaire a été breveté par Otis quelques années après pour les ascenseurs civils. Le système actuel est l'héritier des améliorations apportées à la suite de l'accident de Paymaster (Ontario) en 1945, qui fit 16 morts. Les parachutes sont encore obligatoires aujourd'hui dans la plupart des réglementations nord-américaines, mais ils ne sont plus utilisés en Europe et en Afrique du Sud.

Les ruptures de câbles sont relativement rares et pas une seule n'est survenue en Ontario sur la période 1994-2004. L'analyse de trois accidents récents au Québec (2009, 2011, 2013) a montré que la rupture du câble n'était pas en cause. Par ailleurs, au Québec, la rupture du câble est la cause immédiate et directe d'un seul accident de cage ou de skip au cours des 30 dernières années. Par contre, quelques cas (5) de rupture de câbles au Canada, sur les vingt dernières années, ont été mentionnés par les personnes que nous avons pu rencontrer. Aux États-Unis, les accidents ou incidents de transporteurs sont relativement rares également (0,41 % des décès). Les cas d'écrasement de la cage recensés sont de deux types : puits vertical et écrasement de la cage dans le chevalement (treuil à friction), puits incliné et écrasement de la cage au fond du puits à la suite d'un défaut de freinage.

La méthode de l'arbre de défaillance est utilisée pour comprendre les causes qui mènent à l'écrasement du transporteur au fond du puits. Deux arbres de défaillance sont présentés dans ce rapport. Le premier arbre traite du cas de l'écrasement de la cage au fond du puits (événement indésirable) subséquent à la rupture du câble. L'autre traite du cas de l'écrasement de la cage à l'une des extrémités du puits (événement indésirable) sans rupture du câble. Ces arbres de défaillance seront détaillés dans les volets [2](#) et [3](#) du mandat respectivement et serviront à identifier les forces et faiblesses des différents systèmes de sécurité.

Deux écoles de pensée s'affrontent : (i) la meilleure sécurité est de disposer d'un câble de bonne qualité, bien entretenu et inspecté régulièrement (Afrique du Sud), (ii) les câbles cassent malgré

¹ Maintenant Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST).

les progrès et les inspections, il faut donc un parachute pour éviter l'écrasement de la cage (Amérique du Nord). Le câble est une pièce d'usure qu'il faut surveiller et changer régulièrement contrairement à la machine d'extraction qui est généralement utilisée pour toute la durée d'exploitation du puits. Un câble est sélectionné en fonction de son utilisation et il aura une durée de vie variable suivant l'usage et les équipements : de 12 à 18 mois pour les treuils à tambour lorsque les puits sont très profonds (et jusqu'à 3-4 ans pour les puits moins profonds), et de 24 à 48 mois pour les treuils à friction (jusqu'à 7 ans pour les puits peu profonds). Les câbles mixtes (acier/synthétique) sont peu à peu mis en œuvre dans les puits, et à plus long terme on pourrait peut-être voir l'utilisation de câbles 100 % synthétiques. Les câbles sont sujets à l'usure par abrasion, à la corrosion (externe et/ou interne) et à la fatigue (rupture de fils au cours du temps). Il faut également veiller à limiter les charges dynamiques (accélération ou freinage trop brusques, défauts dans les guides, défaut de rotondité de la molette...) ainsi que le relâchement de la tension du câble qui peut entraîner des défauts. Afin de s'assurer que le câble peut être utilisé sans risques, des inspections visuelles quotidiennes sont effectuées. Ces inspections sont limitées à la partie externe du câble (partie visible) et le câble doit être très propre pour réaliser ces inspections dans les meilleures conditions possibles. Des tests de rupture sont faits à intervalles réguliers afin d'estimer l'état d'usure du câble et des tests non destructifs (électromagnétiques) sont aussi réalisés. Cependant, le test de rupture est effectué sur une section du câble proche de l'attache du transporteur afin de limiter le raccourcissement du câble. Ce test n'est donc peut-être pas représentatif de la résistance réelle à la rupture du câble sur toute sa longueur, car la section testée est probablement la partie du câble la moins sollicitée (pas de frottement, pas de passage sur la molette et charge la plus faible). Il faut néanmoins noter que cette partie du câble est sujette à la corrosion. Des dispositifs de suivi continu du câble ont fait leur apparition sur le marché. Deux types de systèmes coexistent : les systèmes électromagnétiques et les systèmes optiques. Ces systèmes, associés à tout un programme de surveillance du câble, permettent d'abaisser le facteur de sécurité de ce dernier.

En cas de rupture du câble, les parachutes ont pour mission d'arrêter la chute de la cage. Le système traditionnel, installé sur toutes les cages au Québec, est issu des recherches entreprises après l'accident de Paymaster. Il nécessite des guides en bois et se déclenche lorsque la tension dans le câble est insuffisante. Son principe de fonctionnement, le freinage par arrachage de bois, ne permet pas d'avoir un grand contrôle sur la décélération. De plus, l'état des guides en bois et la position relative guides/dents influencent la décélération. Enfin, lorsque la cage est vide, la décélération est plus importante. Des systèmes modernes fonctionnant sur des guides en métal sont proposés par deux compagnies au Canada mais très peu de mines en sont équipées. Il s'agit d'une évolution des systèmes de positionnement de ces compagnies. L'un de ces systèmes a subi un test de chute libre (cage vide) et une décélération moyenne de 1,44 g a été mesurée. Des tests à pleine charge devraient être effectués en Afrique du Sud prochainement. Un des défauts de ces systèmes est le risque de déclenchement intempestif.

La perte de contrôle du déplacement de la cage est l'évènement dangereux qui a mené à la plupart des accidents récents recensés dans ce rapport. Cette partie sera détaillée dans le volet 3. Afin d'éviter la perte de contrôle du déplacement de la cage, on peut utiliser plusieurs systèmes de freinage redondants (mécanique au tambour, dynamique, et éventuellement un frein de câble). Outre ces différents systèmes de freinage, des contrôleurs sont mis en œuvre pour éviter la perte de contrôle du déplacement de la cage. Traditionnellement, c'est le contrôleur Lilly qui est utilisé. Cependant, il est de plus en plus remplacé par des contrôleurs numériques. La fiche technique RF-412 publiée par l'IRSSST en 2005 et citée à l'article 216.1 du règlement sur la

santé et la sécurité du travail dans les mines (RSSM), traite des systèmes de commande programmables².

Toutefois, elle préconise de garder un système de sécurité électromécanique indépendant. Enfin, certaines études récentes s’orientent vers un monitoring global de toutes les composantes du système d’extraction afin d’assurer la sécurité de la cage.

La dernière partie de ce rapport est la comparaison des réglementations provinciales relatives aux câbles d’extraction et aux parachutes. Il en ressort que les parachutes sont obligatoires dans toutes les provinces canadiennes si la cage n’est retenue que par un seul câble. Toutes les provinces demandent une inspection quotidienne, uniquement visuelle dans certaines provinces et plus ou moins complète dans d’autres. À intervalles réguliers, des essais de dégagement rapide doivent être effectués (vitesse initiale nulle) afin de s’assurer du bon fonctionnement du système. Un essai de chute libre (vitesse initiale non nulle) est obligatoire avant la mise en service de la cage et après toute modification apportée aux parachutes ou à la cage. La plupart des provinces prescrivent un intervalle de décélération acceptable pour les essais de chute libre : entre 1 g et 3 g ou entre 0,9 g et 2 g suivant les provinces (il n’y a pas d’intervalle de décélération prescrit par le RSSM au Québec).

Les facteurs de sécurité (FS) des câbles d’extraction sont relativement similaires d’une province à l’autre. En général, un FS de 5,0 à la molette est nécessaire. Deux provinces (l’Ontario et le Québec) permettent d’abaisser ce FS, à la condition que les méthodes d’inspection utilisées en Afrique du Sud soient appliquées (et qu’un programme de suivi continu de l’état du câble soit mis en œuvre au Québec). Les câbles d’extraction doivent être régulièrement lubrifiés et une inspection visuelle quotidienne est obligatoire (au Québec, cette inspection peut être remplacée par un suivi continu de l’état du câble ou une inspection électromagnétique, art. 305). Deux autres types d’essais sont obligatoires dans toutes les provinces : les essais non destructifs et les essais de rupture. La fréquence de ces essais varie significativement d’une province à l’autre. Les essais de rupture sont faits sur des échantillons de 2,5 m de long et il apparaît que le seul laboratoire autorisé à faire de tels essais est celui du ministère du Travail de l’Ontario (MOL) à Sudbury. Quelques provinces réfèrent à la norme CAN/CSA G4 pour les modalités de l’essai, mais dans les faits tous les essais de rupture semblent effectués selon cette norme. Enfin, les critères de retrait des câbles sont relativement semblables : perte de résistance inférieure à 10 %, nombre de fils cassés inférieur à 5 % sur un pas de toron (cause principale de retrait dans les faits), élasticité du câble réduite. Certaines provinces rajoutent d’autres critères de retrait. La norme ISO 4309 (non référencée dans les différentes réglementations provinciales) propose une méthode de calcul des effets cumulatifs de l’usure des câbles.

² La fiche technique RF-412 a été mise à jour, et la nouvelle version, [RF-1049](#) a été publiée en 2019.

TABLE DES MATIÈRES

AVIS DE NON-RESPONSABILITÉ	i
REMERCIEMENTS	iii
SOMMAIRE EXÉCUTIF.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES FIGURES.....	xiii
1. INTRODUCTION	1
2. CONTEXTE CANADIEN, QUÉBÉCOIS ET HISTORIQUE	3
2.1 Caractéristiques des installations minières québécoises.....	3
2.2 Historique du système parachute actuellement en utilisation	4
3. ACCIDENTS ET INCIDENTS	7
3.1 Au Québec.....	7
3.2 Au Canada.....	8
3.3 Aux États-Unis	8
3.4 Dans le reste du monde.....	10
3.5 Synthèse.....	11
4. ARBRE DE DÉFAILLANCE	13
5. ÉVÈNEMENT DANGEREUX : RUPTURE DU CÂBLE.....	15
5.1 Éviter la rupture du câble	15
5.1.1 Sélection, inspection et entretien des câbles	15
5.1.2 Causes d’usure et de rupture des câbles.....	18
5.1.3 Suivi en continu des câbles d’extraction	19
5.2 Parachutes	19
5.2.1 Système traditionnel.....	19
5.2.2 Système « moderne »	22
5.2.3 Friction wedge shoes.....	23
5.2.4 Synthèse	24

6.	ÉVÈNEMENT DANGEREUX : PERTE DE CONTRÔLE DU DÉPLACEMENT DE LA CAGE	25
6.1	Moyens de freinage du treuil et du câble.....	25
6.1.2	Frein dynamique.....	25
6.1.3	Frein de câble.....	26
6.2	Système de surveillance (<i>monitoring</i>) globale.....	26
6.3	Systèmes de commande du treuil / de la cage.....	27
7.	LÉGISLATIONS RELATIVES AUX PARACHUTES ET CÂBLES D'EXTRACTION	29
7.1	Généralités	29
7.2	Systèmes parachutes	30
7.2.1	Parachutes	30
7.2.2	Essais réglementaires	30
7.2.3	Inspection.....	31
7.2.4	Essai de dégagement rapide	32
7.2.5	Essai de chute libre	32
7.3	Câbles	33
7.3.1	Facteurs de sécurité.....	33
7.3.2	Entretien des câbles d'extraction.....	33
7.3.3	Inspection des câbles.....	34
7.3.4	Tests électromagnétiques des câbles d'extraction.....	34
7.3.5	Essai destructifs des câbles d'extraction	34
7.3.6	Critères de retrait des câbles.....	36
8.	CONCLUSIONS	37
	BIBLIOGRAPHIE	39
	ANNEXE I : DÉFINITIONS	47
	ANNEXE II : ARBRES DE DÉFAILLANCE	51
	ANNEXE III : TABLEAUX DE COMPARAISON DES LÉGISLATIONS PROVINCIALES	57
	ANNEXE IV : GLOSSAIRE FRANÇAIS – ANGLAIS.....	63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Accidents miniers mortels survenus entre 2013 et 1998 aux É.-U.....	9
Tableau 2.	Avantages et inconvénients des systèmes parachutes	24
Tableau 3.	Essais réglementaire exigés dans chaque province pour les parachutes.....	31
Tableau 4.	Caractéristiques des essais destructifs des câbles dans les provinces n’exigeant pas le respect de la norme CAN/CSA G4	35
Tableau 5.	Règlements provinciaux sur les parachutes et leur inspection	57
Tableau 6.	Règlements provinciaux concernant les essais sur les parachutes	58
Tableau 7.	Règlements provinciaux (et Western Australia) sur l’inspection et l’entretien des câbles.....	59
Tableau 8.	Règlements provinciaux (et autres) sur les facteurs de sécurité des câbles d’extraction (treuils à tambour).....	60
Tableau 9.	Règlements provinciaux (et Western Australia) sur les essais de câbles d’extraction (treuils à tambour).....	61
Tableau 10.	Règlements provinciaux (et australiens) sur les conditions de retrait des câbles d’extraction	62

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Processus accidentel.	1
Figure 2.	Treuil à tambour double (à gauche) et treuil de type Blair (à droite).	4
Figure 3.	Coupe typique pour un câble à torons triangulaires (à gauche) et câble avec un cœur entouré de plastique (à droite).	16
Figure 4.	Parachutes typiques utilisés au Québec (en bleu la position du guide en bois).....	20

1. INTRODUCTION

Une lettre signée par un représentant de la partie syndicale du sous-comité sur les machines d’extraction du Comité n° 3.57 de révision du Règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines, datée du 25 octobre 2013, demandait de mandater l’IRSST pour évaluer les systèmes d’arrêt d’urgence des transporteurs de mine en usage à travers le monde (parachutes et autres systèmes) puis de soumettre des recommandations à la CSST pour moderniser les parachutes exigés sur les transporteurs de mine au Québec. Cette demande, appuyée par la partie patronale le 31 octobre, fait suite à deux accidents survenus en 2011 et 2013.

Le format général d’un processus accidentel est présenté en Figure 1. Pour le cadre de cette étude, le dommage est l’écrasement de la cage au fond du puits. Si l’évènement dangereux envisagé est la rupture du câble, le facteur d’évitement du dommage est le fonctionnement du parachute. Ainsi le mandat donné à l’IRSST vise à répondre à plusieurs questions :

- Évènement dangereux = rupture du câble (volet 2) :
 - Quels parachutes utiliser (facteur d’évitement)?
 - Comment limiter la probabilité d’occurrence de l’évènement dangereux?
- Évènement dangereux = perte de contrôle du déplacement de la cage (volet 3) :
 - Est-il possible d’envisager un facteur d’évitement, et lequel (ou lesquels)?
 - Comment limiter la probabilité d’occurrence de l’évènement dangereux (systèmes de commande, monitoring de la cage, PLC...)?

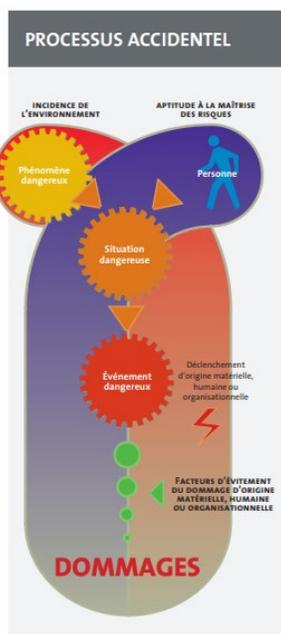


Figure 1. Processus accidentel.

De « Sécurité des machines : phénomènes, situations, évènements dangereux et dommages », par S. E. Robert, L. Giraud et Y. Chinniah, 2017, p. 5. (<https://www.cnesst.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/dc200-1581web.pdf>). ©CNESST, 2017. Reproduit avec permission.

Le mandat comportera donc trois volets principaux :

1. Revue des systèmes parachutes, des systèmes de freinage d'urgence et des législations provinciales et internationales ;
2. Recommandations dans le cas où il y a rupture du câble d'extraction ;
3. Recommandations dans le cas où il y n'a pas rupture du câble d'extraction.

Le présent rapport présente le premier volet de ce mandat³. L'objet n'est pas ici de détailler de manière exhaustive chaque problématique liée aux cas d'écrasement de la cage, mais de donner un aperçu général du problème. De plus amples informations seront données pour les cas spécifiques abordés dans les volets [2](#) et [3](#) du mandat.

Le rapport comprend un bref historique des systèmes parachutes actuellement en utilisation dans les mines québécoises, ainsi qu'un survol des accidents récents reliés aux transporteurs de mines. Ensuite, des arbres de défaillance sont présentés. Par la suite, une revue des parachutes, des systèmes de freinage d'urgence et des causes d'usure du câble est proposée. Enfin, les législations en vigueur au Québec et dans les autres provinces du Canada sont comparées.

Les annexes présentées à la fin du rapport incluent :

- des définitions générales afin d'aider le lecteur à la compréhension du texte ;
- les arbres de défaillance discutés en section 4 ;
- des tableaux comparant en détail les règlements provinciaux applicables aux parachutes et aux câbles d'extraction ;
- un glossaire français / anglais pour les termes techniques.

³ Cette étude datant de 2014, il se peut que certains liens mentionnés ne soient plus fonctionnels.

2. CONTEXTE CANADIEN, QUÉBÉCOIS ET HISTORIQUE

Au Canada, la plupart des mines souterraines sont équipées d'une machine d'extraction à tambour : 300, contre 43 treuils à friction (Udd, 2004). Les treuils à tambour sont plus courants dans les mines métalliques profondes où le roc est extrait sur plusieurs niveaux (Leonida, 2013).

Sur les 20 dernières années, de nombreuses évolutions sont apparues :

- Systèmes de positionnement sans freins mécaniques ;
- Systèmes de contrôle de vitesse ;
- Redondances pour les systèmes de commande ;
- Systèmes de commande numériques ;
- Utilisation de freins à disque ;
- Systèmes de contrôle du freinage ;
- Systèmes de commandes dans la cage ;
- Intervention de l'opérateur de la machine d'extraction de moins en moins nécessaire.

Il paraît donc nécessaire de discuter de la fiabilité de ces nouveautés, et de détailler lesquelles sont utilisées au Québec, et dans quelles proportions.

2.1 Caractéristiques des installations minières québécoises

Selon le ministère des Ressources naturelles, il y a 16 mines pour les minéraux métalliques et 7 mines pour les minéraux non métalliques. Sur ces mines, 17 sont des mines souterraines (16 métalliques et 1 non métallique). La CSST identifiait, en mai 2014, 14 mines souterraines en activité, avec 24 puits (dont 3 souterrains) et 35 machines d'extraction. Il est difficile de citer des chiffres exacts et durables dans le temps puisque les activités minières sont parfois arrêtées puis reprises dans certains puits. Par ailleurs un unique puits de mine peut être pourvu de plusieurs machines d'extraction (une machine pour les deux skips, une autre pour la cage, et une dernière pour la marianne). Pour la suite du document, le terme mine fera uniquement référence à des mines souterraines.

Presque toutes les mines du Québec sont équipées de guides en bois pour les cages, et généralement de treuils à tambour simple ou double (à l'exception d'une mine équipée de câbles guides et d'un treuil à friction) (Figure 2). Ne s'agissant généralement pas de treuils multicâbles, la sécurité en cas de rupture de l'unique câble est assurée par le système parachute.

Les treuils de type Blair (*Blair Multi-Rope* ou *BMR*) ont été développés en Afrique du Sud et sont surtout utilisés pour les puits de très grande profondeur (> 2 000 m) ou les charges très importantes, ils coûtent cependant presque trois fois plus chers que les treuils à tambour traditionnels (Leonida, 2013). Ce surcoût est en partie expliqué par les systèmes de compensation nécessaires pour répartir également la charge sur les deux câbles. Les treuils BMR sont progressivement abandonnés au profit des treuils à tambour double, qui permettent d'atteindre des résultats similaires à des coûts réduits depuis l'introduction de facteurs de sécurité (FS) réduits (McLaughlin, 2004a). Pour les guides en bois, la vitesse limite d'extraction est de l'ordre de 11 m/s (2 200 ft/min), 18 m/s avec des guides en métal (3 600 ft/min), et 20 m/s avec des câbles guides (4 000 ft/min) (Tiley, 2011).

Un tableau synthétisant les principales caractéristiques des puits de mine dans la province sera présenté dans le volet [2](#).

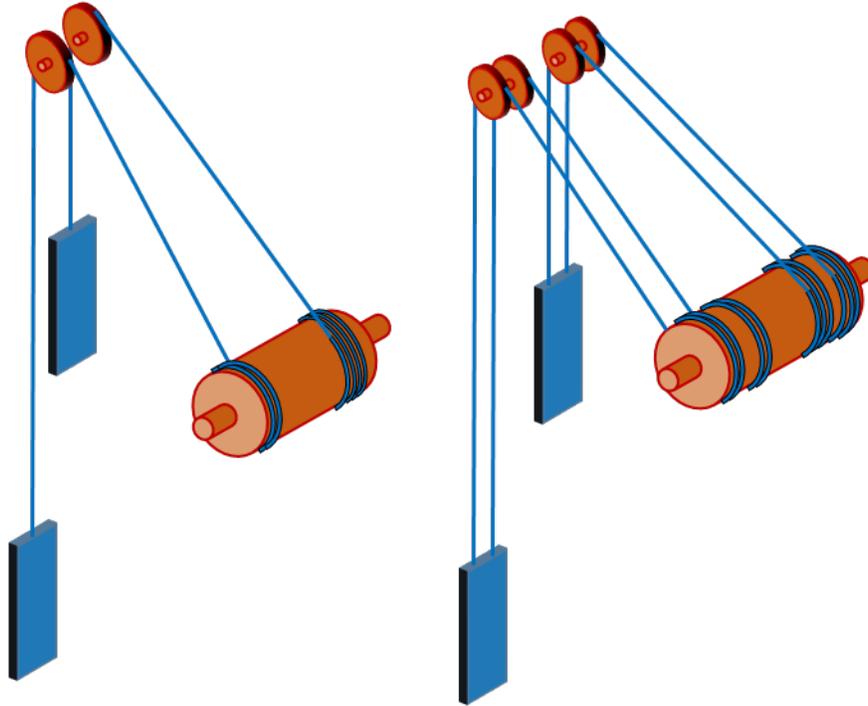


Figure 2. Treuil à tambour double (à gauche) et treuil de type Blair (à droite).

2.2 Historique du système parachute actuellement en utilisation

Au XIX^e siècle, une des causes d'accident mortel dans les mines était la chute des cages servant à la descente des mineurs dans le puits lors de la rupture du câble.

En 1845, le Français Pierre-Joseph Fontaine invente un système de frein se déclenchant lors de la rupture du câble (Mouys, 1984). Un ressort est maintenu comprimé par la tension du câble et, en cas de rupture, il libère les mâchoires des parachutes qui viennent mordre dans les guides en bois, évitant l'écrasement de la cage au fond du puits. Entre 1851 et 1859, dix-neuf ruptures de câble ont été répertoriées en France et aucune de ces ruptures de câble n'a entraîné de décès grâce au parachute de Fontaine. Le système a par la suite été installé dans plusieurs mines en Europe. Ce principe, l'arrêt de la cage en cas de rupture du câble, est aussi découvert en 1853 par Elisha Otis qui le transpose aux ascenseurs commerciaux après une démonstration publique. Otis brevette en 1861 (Otis, 1861) un ascenseur équipé d'un dispositif de sécurité (Barkand, 1990). Les parachutes actuels sont, sur le principe, similaires à celui inventé par M. Fontaine (Gorzalczynski, 2002). Plusieurs brevets de parachutes ont été déposés au XX^e siècle jusque dans les années 1950 (Bjerke, 1946 ; Gagnon, 1949 ; Malston, 1909 ; Vaydo, 1950).

Le système actuel utilisé au Canada a été développé à la suite de l'accident de la mine de Paymaster (Ontario) qui a eu lieu le 2 février 1945 (le câble a cassé et la cage a fait une chute de 1 700 pieds dans le puits, entraînant la mort de 16 travailleurs). Lors de cet accident, les

parachutes se sont engagés dans les guides, mais pas assez profondément pour arrêter la chute de la cage. Plusieurs causes ont été identifiées : usure des guides en bois, mauvais positionnement guides / parachutes, déploiement partiel des parachutes. Le FS du câble était de 6,8 à la molette, et la cage n’était pas à charge maximale ce jour-là (Tower *et al.*, 1946). Des tests avaient été faits récemment avant l’accident : il n’y avait pas de traces de corrosion sur le câble, la résistance à la rupture était bonne, et le test d’élongation était concluant. Les causes de la rupture du câble sont l’usure et la corrosion internes sans signes extérieurs (Tower *et al.*, 1946). À la suite de cet accident, des travaux de recherche ont été entrepris et ont conduit à des recommandations relatives aux détails de conception des parachutes pour les transporteurs miniers (Young, 1947). Les recommandations faites ont permis d’augmenter la performance et la fiabilité des parachutes (Larsen *et al.*, 1972).

Les parachutes sont encore obligatoires aujourd’hui dans la plupart des réglementations nord-américaines, mais ils ne sont plus utilisés en Europe et ne sont pas utilisés en Afrique du Sud.

3. ACCIDENTS ET INCIDENTS

Les ruptures de câbles d’extraction sont des évènements plutôt rares (McLaughlin, 2013) : selon Udd (2004), il n’y a pas eu une seule rupture en Ontario sur la période 1994-2004. Si ces cas de ruptures sont rares, c’est dû en partie à des FS relativement élevés (5,0 à la molette) basés sur des années d’expérience, ainsi qu’à un suivi et un entretien régulier des câbles. Ces informations concordent avec celles tirées de l’analyse des accidents survenus aux États-Unis d’Amérique ainsi qu’au Québec. Statistiquement, la plupart des ruptures de câbles surviennent en montée, lorsque la cage est chargée : la décélération subie lors de l’arrêt de la cage devrait donc être faible (Gorzalczynski, 2002).

Trouver de l’information sur les accidents n’est pas si aisé : suivant les pays ou les provinces de certains pays, les lois d’accès à l’information ne sont pas les mêmes, et souvent seules des statistiques très générales sont données. MacNeill (2008) a cherché à obtenir le maximum de comptes rendus d’accidents avec décès afin de bâtir une base de données et a été confronté à ces difficultés. Les incidents ne sont pas nécessairement répertoriés, et il est ainsi assez difficile d’avoir une connaissance exhaustive des cas de rupture de câble. Néanmoins, cette section présente les accidents et incidents que nous avons pu identifier pour le Québec, le Canada, les États-Unis et quelques autres pays.

3.1 Au Québec

Trois accidents / incidents sont survenus récemment en lien avec des transporteurs miniers :

- En octobre 2009, dans le puits de la mine Lac Bachelor, située dans le secteur de Desmaraisville, trois travailleurs décèdent par noyade lorsque la cage skip dans laquelle ils prennent place est immergée dans l’eau à la hauteur du 11^e niveau. Une fuite d’eau au-dessus du 11^e niveau conjuguée à la non-détection du niveau de l’eau avant la descente de la cage sont les causes de cet accident. Un autre travailleur subit un choc nerveux. Cet accident a été enquêté par la CSST (CSST, 2010) ;
- En juillet 2011, à la mine Doyon (IamGold corp.), durant des travaux de maintenance sur la machine d’extraction, le frein de service du tambour s’est relâché et le tambour s’est mis en mouvement entraîné par la cage-skip qui s’est finalement écrasée au fond du puits. Le frein d’urgence était malheureusement désactivé à cause des travaux de maintenance (contrepois soutenu par un étai temporaire). Cet incident a été enquêté par la CSST (CSST, 2012) ;
- En juin 2013, à la mine de Westwood (IamGold corp.), une nouvelle cage (le projet est en développement) s’est écrasée au fond du puits⁴. Le problème serait dû à la commande du treuil : en effet, malgré l’enclenchement de l’interrupteur d’arrêt d’urgence, le transporteur semble avoir continué sa course jusqu’au fond du puits. Cet incident n’a pas été enquêté par la CSST, ce qui ne permet pas d’en connaître les causes exactes.

Un incident plus ancien s’était déjà produit le 31 août 1982 au puits Cooke. Cette année-là, un skip chargé de minerai s’est écrasé au fond du puits à cause de la rupture du câble métallique, sans blesser de travailleur. L’usure excessive du câble est la cause de sa rupture sous charge.

⁴ TVA Abitibi-Témiscamingue, Accident à la mine Westwood : Une vérification quotidienne préventive fait éviter le pire, le 21 juin 2013 - 12 h 25 | kvachon@rncmedia.ca

Cette usure très rapide du câble (en 15 jours) a été, *a priori*, causée par un défaut de profil de la gorge de la molette conjuguée à un diamètre légèrement trop important du câble et à son mauvais enroulement sur le tambour. Ces trois causes techniques ne semblent pas avoir été identifiées par l'équipe chargée de la maintenance du treuil. Cet incident a été enquêté par la CSST (CSST, 1982).

Lors d'une rencontre avec CanMet en février 2014, quelques incidents ont été évoqués :

- 1996, accident mortel à la mine Bouchard-Hébert, porte du skip qui s'ouvre et arrache le boisage sur plusieurs mètres en remontant. Cet accident a été enquêté par la CSST (CSST, 1996) ;
- 1999, dans une autre mine un câble de 1"7/8 (48 mm) casse, le système parachute a fonctionné (aussi mentionné par trois autres intervenants rencontrés). Deux versions sur les causes probables de cet accident : attaque du câble par l'acidité de l'eau qui s'écoulait dans le puits ou nœud (kink) non détecté dans le câble suite à un mou de câble non intentionnel ;
- 28 Juillet 2000 : une cage tombe au fond du puits d'une mine (pas plus de renseignements) ;
- Mars 2008 : un cuffat tombe au fond du puits à la suite d'une rupture de câble. Le cuffat a été retenu par un câble électrique lors de la descente. Comme le treuil n'était pas équipé d'un système de détection de mou de câble, le câble a été déroulé puis le câble électrique a plié, libérant le cuffat et le mou de câble ;
- Novembre 2010 : rupture du câble à cause d'un problème de frein mal réglé ;
- Décembre 2011, câble cassé, car la cage / le skip est rentré dans le chevalement : environ 300' de câble avaient été coupés, mais la remise à zéro des longueurs de câble n'a pas été faite par les mécaniciens au niveau des encodeurs. Les parachutes se sont appliqués à la suite de la rupture du câble, et le transporteur a été retenu dans le puits.

3.2 Au Canada

Un des accidents les plus meurtriers au Canada a eu lieu en février 1945 à la mine de Paymaster, tel que mentionné en section 2.2. Le rapport de Young (1947) donne les statistiques suivantes pour les accidents de 1946 : 30 % d'entre eux sont dus à un câble détérioré (16 cas en tout, 9 liés à la corrosion uniquement et les 7 autres à une combinaison d'usure et de corrosion). Harrington et East ont listé les accidents survenus en Ontario durant la période 1925-1945 (Harrington et East, 1948).

Plus récemment (vers 2008), dans une mine en Ontario un câble a cassé. Le câble semblait mal entretenu et l'exploitation de sel n'a pas aidé à le préserver de l'usure.

3.3 Aux États-Unis

Les statistiques sur les accidents relativement anciens ne sont pas disponibles, à l'époque la plupart du temps ces accidents n'étaient pas enregistrés (Harrington et East, 1948). Pour les accidents répertoriés, il a été noté que dans beaucoup de cas, les guides n'étaient pas assez bien fixés (Harrington et East, 1948). Entre 1995 et 2005 aux États-Unis (Kecojevic *et al.*, 2007), les trois types de machines qui ont entraîné des décès sont les camions miniers (22,36 %), les convoyeurs (9,32 %) et les chargeuses (8,49 %). Les accidents de levage arrivaient en dernier

avec 0,41 % des décès, soit 2 occurrences. Ces données de 2007 sont confirmées par une interrogation du site du MSHA en 2014 qui, après analyse, permet de dire que sur tous les accidents mortels survenus dans les mines sous la juridiction du MSHA entre 2013 et 1998 (Tableau 1), seulement trois personnes sont décédées dans des accidents liés à la chute de dispositifs de levage tractés par un câble⁵, ce qui représente 0,3 % des décès. Ces deux accidents sont survenus dans des mines de charbon, l’un en 2000 (deux personnes) et l’autre en 2001 (une personne). Les dispositifs en cause étaient des funiculaires inclinés.

Dans le premier cas (2000), les wagons du funiculaire se sont bloqués dans la descente et le treuil a continué à dérouler le câble. Une fois les wagons débloqués, ils sont descendus sans contrôle pour reprendre le mou dans le câble. Le câble s’est rompu lorsque tout le mou a été repris, puis les wagons ont fini par dérailler en bas de la pente. Dans le second cas (2001), trois wagons du funiculaire se sont détachés du wagon de tête et ils sont descendus sans contrôle pour aller frapper un travailleur présent en bas du puits incliné. Dans les deux accidents, les trains étaient équipés de dispositifs de freinage d’urgence. Dans l’accident de 2000, le bouton d’activation du freinage d’urgence était situé dans un seul des deux wagons et les travailleurs étaient situés dans l’autre. De plus, le déclenchement du dispositif de freinage d’urgence par survitesse (115 % de la vitesse maximale) n’a pas fonctionné lors de l’accident. Dans l’accident de 2001, le seul wagon équipé du système de freinage d’urgence ne s’est pas décroché. Cependant, le déclenchement du dispositif de freinage d’urgence par survitesse (115 % de la vitesse maximale) n’a pas fonctionné lors des tests effectués au cours de l’enquête. De plus, le dispositif de freinage d’urgence n’était dimensionné que pour un seul wagon et non pas pour les quatre utilisés lors de l’accident.

Il est à noter que les dispositifs de freinage d’urgence doivent être testés aux deux mois selon la législation en vigueur Section 75.1400(c) (30-CFR - Part 75, 2014).

Tableau 1. Accidents miniers mortels survenus entre 2013 et 1998 aux É.-U.

	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998
charbon	20	20	21	48	18	30	34	47	22	27	30	28	42	38	34	29
m/nm	22	16	16	23	17	23	33	26	35	27	26	42	30	47	53	50
Total	42	36	37	71	35	53	67	73	57	54	56	70	72	85	87	79

Sources : <https://arlweb.msha.gov/stats/centurystats/mnmstats.asp>, visité le 10 novembre 2021 ;
<https://arlweb.msha.gov/stats/centurystats/coalstats.asp>, visité le 10 novembre 2021.

Deux autres accidents, d’un type différent, mais toujours lié au treuil dans un puits de mine, sont survenus en 1977 et 1987 (Barkand, 1992b). Le premier a eu lieu en décembre 1977 dans la mine Island Creek Coal VP-5, équipée d’un treuil à friction. La cage s’est écrasée sur le chevalement à une vitesse de 4 734 pieds/min. La cage a été appelée à monter, mais n’a pas bougé lors du relâchement des freins. Le bouton de frein d’urgence a ensuite été actionné, ce qui

⁵ *HOISTING - Damage to hoisting equipment in a shaft or slope which endangers an individual or interferes with use of the equipment for more than 30 minutes. Hoisting may also be the classification where a victim was injured by hoisting equipment but there was no damage to the equipment. Accidents involving cages, skips, buckets, or elevators. The accident results from the action, motion, or failure of the hoisting equipment or mechanism. Included is equipment such as derricks and cranes only when used in shaft sinking ; suspended work platforms in shafts ; mine cars being lowered or raised by hoisting equipment on slopes or inclines ; a skip squeezed between timbers resulting in an accident ; or an ore bucket tipped for any reason causing an accident.*

aurait dû enclencher le frein du tambour. Cependant ce frein n'a pas fonctionné et la cage a accéléré rapidement vers le haut. L'opérateur a ensuite actionné les coupe-circuits, mais le temps qu'il le fasse, la cage s'est écrasée dans le chevalement. Le second a eu lieu en 1987 dans la mine Duquesne Light Company's Warwick No. 3 North Postal. Un ascenseur automatique s'est écrasé sur le chevalement à une vitesse de 2 118 pieds / min (3 fois la vitesse normale). La garniture des freins a fait défaut et a été arrachée du frein de tambour. Le contrôleur de vitesse s'est déclenché, mais les *parachutes* n'ont pas fonctionné dans la direction ascendante.

Aux États-Unis, dans les années 1990, environ 10 % des incidents étaient liés à la machine d'extraction, et 90 % de ces 10 % sont liés à des erreurs dans l'opération du treuil. La recherche sur le monitoring de la cage et de la machine d'extraction serait donc pertinente (Anon, 1995). Pour la période 1995-2004 : 7 % des incidents étaient liés à la machine d'extraction (Groves *et al.*, 2007). Enfin, on peut noter que sur l'année 1992, 62,5 % des incidents dans les mines métalliques ont été attribués à des défaillances ou des problèmes de maintenance (Kovalchik et Duda, 1995).

3.4 Dans le reste du monde

À travers le monde, à la suite d'accidents importants impliquant des transporteurs de mines, des commissions ont été créées pour étudier la pertinence des parachutes (Young, 1947) :

- Angleterre, 1880 : ne recommande pas les parachutes ;
- Allemagne, 1899 (à la suite d'un accident avec 17 morts) : en faveur de l'utilisation des parachutes ;
- Afrique du Sud, 1905 (à la suite d'un accident avec 44 morts) : l'utilisation de parachutes est laissée au jugement du Government Mining Engineer ;
- Angleterre, 1924 : étude portant sur la rupture des câbles ;
- Allemagne, 1934 : comité de recherche sur les câbles.

L'accident le plus tragique lié à un treuil minier dans les dernières années s'est déroulé en 1995. Le 10 mai, une cage contenant 105 mineurs s'est écrasée au fond du puits no 2 de la mine Vaal Reefs en Afrique du Sud⁶. Une locomotive est tombée dans le puits de la mine et a entraîné la cage dans sa chute, cage qui remontait les mineurs à la fin du quart de nuit.

En Australie, les statistiques de la province du Queensland indiquent qu'entre 1 % et 5 % des incidents chaque année sont liés à la machine d'extraction ou au convoyeur (Queensland, 2013). Pour la province du New South Wales, en 2002, la rupture d'un câble d'équilibre a été signalée. Il n'y a pas eu de blessés, mais cet incident aurait pu être un grave accident si le câble rompu était tombé sur la cage (Regan, 2002). Toujours au New South Wales, en 1999, un câble d'extraction (puits incliné) de 52 mm de diamètre (186 tonnes de résistance à la rupture) a cassé après 15 mois de service (sous une charge de 59 tonnes) (Smith et Koppe, 2008). Les essais réalisés à la suite de cet incident montrent que les torons externes contribuent pour 57 % à 66 % de la résistance du câble. Le test du câble à différents endroits a donné les résultats suivants :

- Proche du tambour \approx 90 % de la limite de rupture ;
- Au niveau du frein de câble \approx 35 % - 40 % de la limite de rupture ;
 - Fin de la rampe \approx 50 % de la limite de rupture.

⁶ McCook Daily Gazette, May 11, 1995, *As many as 100 feared dead in mine accident.*

D'autres résultats d'essais montrent que la perte de diamètre n'est pas un paramètre assez précis pour déterminer la perte de résistance (Smith et Koppe, 2008).

En Afrique du Sud, un rapport du SIMRAC indique qu'un incident est survenu sur un treuil BMR : un câble a cassé, ce qui a conduit ultérieurement à une modification du système de compensation (Hecker, 1996). En effet, sur les tests effectués il n'était pas rare d'observer une perte de résistance allant jusqu'à 50 %. Un incident a eu lieu assez récemment à la mine Driefontein : le câble a cassé au niveau de la roue de compensation et le skip s'est écrasé au fond du puits (Kotzé, 2010).

Les statistiques en Inde pour les mines de charbon indiquent que la probabilité d'accident majeur (plus de quatre morts) dans un puits est d'environ 1 % ou 2% par an (Maiti *et al.*, 2009). Enfin, les travaux de MacNeill (2008) montrent que sur les 2808 accidents mortels qu'il a répertoriés, environ 10 sont liés à un écrasement de la cage, soit 0,37 % (MacNeill, 2008).

3.5 Synthèse

Au Québec, la rupture du câble est la cause directe d'un seul accident de cage ou de skip au cours des 30 dernières années. L'écrasement de trois cages ou skips au fond de puits dans les dernières années n'est pas lié à la rupture du câble, mais plutôt à des erreurs de commande du treuil ou à des erreurs organisationnelles. Les défaillances de commande ou les erreurs de commande étaient déjà une des causes d'incident dans les années 1990 : sur une période de 5 ans, 18 cages se sont écrasées sur le chevalement (Barkand, 1990). Par ailleurs, les statistiques aux États-Unis montrent également que les erreurs d'opération des machines d'extraction sont la principale cause d'incidents (Anon, 1995).

Au Québec, l'accident de 1982 a eu lieu lors de la phase d'exploitation. Les accidents de 2009 et 2013 ont eu lieu lors de la phase de démarrage de la mine (ou redémarrage pour 2009). L'incident de 2011 a eu lieu lors d'une opération de maintenance du treuil. Aux États-Unis, les deux accidents mentionnés se sont produits lors de la phase d'exploitation des mines.

Les câbles d'extraction sont une pièce d'usure qui doit être changée régulièrement (Chaplin, 2008 ; Udd, 2004). Les critères limites quant à l'usure du câble sont multiples et varient d'une province à l'autre (voir section 7). Cependant, selon Udd (2004), les inspections visuelles journalières, outre leurs limites (elles permettent de détecter les défaillances *visibles* uniquement), sont parfois faites un peu légèrement (Baumann, 2009), et il faudrait repenser la formation des inspecteurs (ou l'installation de dispositifs de suivi en continu) afin d'envisager l'abaissement des FS. Enfin, l'incident survenu au New South Wales montre que la résistance à la rupture n'est pas uniforme sur toute la longueur du câble (Smith et Koppe, 2008).

4. ARBRE DE DÉFAILLANCE

Les sections 2 et 3 se sont attachées à présenter le contexte minier canadien (plus particulièrement québécois) et les types d’accidents (et incidents) que l’on peut retrouver dans la littérature. Cette section vise à identifier l’enchaînement des évènements pouvant conduire à un écrasement de la cage, que cet écrasement soit successif à une rupture du câble d’extraction ou non.

Un arbre de défaillance est une représentation graphique, reposant sur une logique booléenne, des enchaînements d’évènements nécessaires pour mener à un évènement sommet redouté (Ericson, 2005 ; Vincoli, 2006). La construction des arbres de défaillance est basée sur un système déductif : on part de l’évènement sommet et on cherche la ou les causes (évènements intermédiaires ou élémentaires). Les arbres de défaillance permettent une analyse qualitative (occurrence simultanée d’évènements pour produire l’évènement redouté) et quantitative (calcul de la probabilité d’occurrence de l’évènement redouté) de systèmes complexes (Ericson, 2005). Dans le cadre de ce rapport, deux arbres de défaillance sont proposés, correspondant chacun à un évènement redouté :

- Écrasement de la cabine subséquent à une rupture du câble ;
- Écrasement de la cabine subséquent à une défaillance du treuil (sans rupture du câble).

Dans les deux cas, le dommage associé pourra être caractérisé comme « grave » (une ou plusieurs blessures graves à un ou plusieurs travailleurs) ou « extrêmement grave » (décès d’un ou plusieurs travailleurs, car les cages peuvent transporter plusieurs travailleurs). L’analyse de ces arbres de défaillance sera uniquement qualitative et visera principalement à identifier les coupes minimales et les éléments les plus sensibles composant le système.

Une coupe est un ensemble d’évènements qui, pris ensemble, mènent à l’évènement sommet, on peut aussi l’appeler chemin de défaillance (Delahaye, 2010 ; Ericson, 2005). Par la suite, il est possible d’identifier les coupes minimales : les combinaisons réduites au maximum menant à l’évènement sommet (Delahaye, 2010 ; Ericson, 2005). De fait, si l’on retire à une coupe minimale un seul de ses éléments, n’importe lequel, on n’aboutit plus à l’évènement sommet (Mortureux, 2002). Les coupes minimales sont donc les combinaisons de causes les plus simples qui vont entraîner l’évènement indésirable. Les coupes seront détaillées dans les volets [2](#) et [3](#) du mandat.

Le principe de construction d'un arbre de défaillance repose sur trois niveaux :

- Identification des causes immédiates nécessaires et suffisantes (INS) à l'apparition d'un évènement (Ericson, 2005 ; IEC 1025:1990) ;
- À chaque étape, on peut classer les défaillances dues soit à « l'état du système » (State-of-the-System / SoS), que l'on raffindra en identifiant les causes INS (Delahaye, 2010), soit à « l'état d'un composant » (State-of-the-Component / SoC) ;
- Pour l'état d'un composant, on pourra détailler en associant l'origine de la défaillance à l'une des trois catégories suivantes à l'aide d'une porte OU (Ericson, 2005) :
 - Primaire : l'élément ou sous-système est défaillant du fait d'un problème intrinsèque,
 - Secondaire : l'élément ou sous-système est défaillant à cause d'un problème d'origine extérieure,
 - Commande : avènement d'un évènement attendu à un moment non désiré.

Les arbres de défaillance, présentés en annexe II, sont préliminaires et seront détaillés dans les volets [2](#) et [3](#) du mandat.

L'un traite du cas de l'écrasement de la cage au fond du puits (évènement indésirable) subséquent à la rupture du câble. L'autre traite du cas de l'écrasement de la cage à l'une des extrémités du puits (évènement indésirable) sans rupture du câble.

5. ÉVÈNEMENT DANGEREUX : RUPTURE DU CÂBLE

L’arbre de défaillance discuté dans la section 4 et présenté en annexe II fait état d’un grand nombre de causes possibles conduisant à l’écrasement de la cage dans le cas d’une rupture de câble.

Il y a deux écoles de pensée vis-à-vis de la sécurité des transporteurs miniers (Larsen *et al.*, 1972 ; Young, 1947) :

1. Le meilleur système de sécurité est d’avoir un bon câble (c’est l’école de pensée dominante en Afrique du Sud) : les parachutes sont peu (pas) efficaces si le câble casse à grande distance de la cage, et ne servent à rien si le problème vient du treuil ;
2. Les ruptures de câbles arriveront toujours, malgré les inspections et les essais, et les parachutes restent la dernière option de sécurité, c’est l’avis majoritaire en Amérique du Nord (Harrington et East, 1948).

5.1 Éviter la rupture du câble

Un effort de recherche très important, sur les causes d’usure, de rupture et les critères de sélection des câbles, a été fourni en Afrique du Sud dans les années 80 et 90, conduisant à la publication de nombreux rapports, dont les conclusions seront discutées dans le volet [2](#) (Van Zyl, 2002). Cette section aborde les grandes lignes des problématiques liées aux câbles qui seront détaillées dans le volet [2](#) du mandat.

5.1.1 Sélection, inspection et entretien des câbles

Un câble est généralement constitué d’un noyau central (le cœur) entouré de torons. Les câbles sont sélectionnés en fonction de leur utilisation et auront une durée de vie variable suivant les équipements : de 12 à 18 mois pour les treuils à tambour, et de 24 à 48 mois pour les treuils à friction.

Structure et types de câbles

Le rôle principal du cœur est de maintenir les torons externes en place, et la capacité du cœur à effectuer ceci correctement affecte la résistance à la fatigue du câble (Klein, 2010). On remarque, en général que moins il y a de fils, plus le câble est résistant à l’usure et à la corrosion et plus il y a de fils, plus le câble est souple (HSE, 2004). La limitation du nombre de torons externe permet de diminuer la sensibilité à l’écrasement des câbles (Scheunemann *et al.*, 2009). On choisit un fini de surface non galvanisé pour les conditions sèches (pas de risque de corrosion), et galvanisé s’il y a un risque de corrosion (HSE, 2004).

Les grandes catégories de câbles sont présentées ci-dessous :

- *Fibre core* (FC) : câbles très flexibles et bons pour la plupart des usages. Parmi les avantages : faciles à fabriquer, ne pourrissent pas, maintiennent mieux la lubrification que les cœurs en acier (HSE, 2004). Il y a aussi la question de l’empilement des couches sur le tambour à étudier : ces câbles présentent un risque d’écrasement (Dietz *et al.*, 2009) ;

- *Wire strand core (WSC)* : moins flexibles, mais plus résistants à l'écrasement (HSE, 2004), les modèles les plus simples n'ont que six torons externes (Scheunemann *et al.*, 2009) ;
- *Independent wire rope core (IWRC)* : résiste bien à l'écrasement, plus flexible que le WSC (Erdonmez et Imrak, 2011) ;
- Câbles multi-torons : câbles antigiratoires, utilisés pour le fonçage et qui résistent plutôt mal à l'écrasement dû à l'enroulement sur plusieurs niveaux au tambour (Tiley, 2011) ;
- Câbles clos (ou semi-clos) : la structure est compacte et résiste bien à l'écrasement, la corrosion pénètre plus difficilement à l'intérieur. Ce type de câble, peu flexible, est surtout utilisé pour les câbles-guides (Tiley, 2011).

Les câbles mixtes (cœur en fibres et torons externes en métal) sont développés depuis quelques années (Klees *et al.*, 1989 ; Ridge *et al.*, 2007). L'avantage des câbles mixtes est de proposer une résistance similaire à celle des câbles entièrement en acier pour un poids moindre : ainsi, pour les puits très profonds où le poids du câble est critique, il est possible de transporter des charges plus lourdes dans le skip. Des travaux de recherche sont en cours afin d'utiliser des câbles 100 % synthétiques, en fibres d'aramide : les tests de résistance à l'écrasement ont été concluants (Anon, 2012c ; Hunter, 2013 ; Tollinsky, 2012).

Les câbles avec un cœur entouré de plastique (Figure 3) commencent à être utilisés dans les mines et présentent souvent une durée de vie accrue par rapport aux câbles conventionnels (Greyling *et al.*, 2007 ; Kleynhansm J. *et al.*, 2007 ; Smith et Verreet, 2005 ; Van Rensburg *et al.*, 2009).

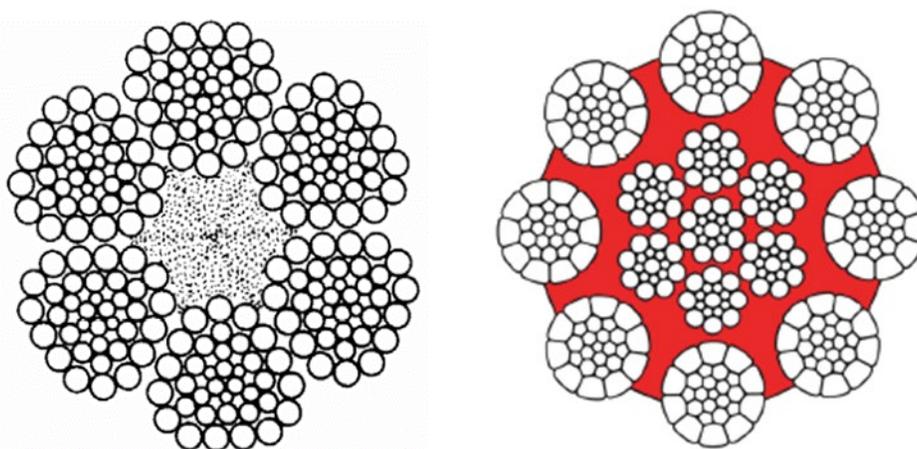


Figure 3. Coupe typique pour un câble à torons triangulaires (à gauche) et câble avec un cœur entouré de plastique (à droite).

De « A case study of 54 mm ropes operating on a double drum rock winder », par J. Kleynhansm, J. Kapp, G. Rebel et B. Schmitz, 2007, OIPEEC Conference, p. 197 et 198. ©OIPEEC, 2007. Reproduit avec permission.

Inspection ponctuelle

Plusieurs méthodes non destructrices sont envisageables pour inspecter l’état d’un câble : une inspection visuelle, un test électromagnétique, un test radiographique ou encore une méthode acoustique (pour repérer les fils qui cassent) (El Barkany *et al.*, 2013).

Selon la norme européenne EN 12927-7, la vitesse maximale d’inspection visuelle pour un câble ne devrait pas dépasser 0,5 m/s (Kopanakis, 2011). La vitesse d’inspection est de 2 m/s en Afrique du Sud. Plusieurs facteurs de détérioration peuvent être détectés à l’aide d’une inspection visuelle : fils externes cassés, fils détendus, corrosion et usure externes, dommages mécaniques et modification de la microstructure externe (Kopanakis, 2011). En revanche, ce type d’inspection se limite aux défauts visibles uniquement (Udd, 2004) et est parfois difficile à effectuer en raison de l’état de propreté du câble. Par ailleurs, l’inspection visuelle du câble est une tâche aliénante et génère une fatigue importante en raison de la concentration requise (Platzer *et al.*, 2009 ; Winspect, 2014). Une inspection visuelle ne peut être optimale au-delà de quelques minutes.

Les essais non destructifs font partie du suivi courant des câbles d’extraction, cependant certains types de câbles (clos et semi-clos notamment) demandent un matériel particulier (Anderson *et al.*, 1994 ; HSE, 2004). Les essais électromagnétiques ne permettent pas de détecter la fragilisation de surface ou la plastification (El Barkany *et al.*, 2013). Les données d’un test électromagnétiques permettent d’identifier une perte de section (*Loss of metallic area*, LMA, due à la corrosion et / ou l’abrasion) et des défauts localisés (*Localized fault*, LF, due à des fils cassés) (Canova *et al.*, 2011 ; Canova *et al.*, 2009). À partir de ces informations, il est possible d’estimer la charge admissible du câble (Slesarev et Vorontsov, 2012). Un rapport du HSE détaille le fonctionnement des instruments permettant d’effectuer des essais non destructifs et les différences entre les manufacturiers (HSE, 2000). La norme ASTM E1571 encadre les essais électromagnétiques sur les câbles métalliques (ASTM E1571, 2011).

Test destructif

Des tests destructifs réalisés à intervalles réguliers restent nécessaires pour vérifier la résistance résiduelle du câble (Udd, 2004). Miscoe et McKewan (1993) indiquent que les tests de résistance en tension faits sur les sections coupées à l’attache ne donnent pas une mesure précise de la perte de résistance du câble. En effet, la partie attachée à la cage ne passe jamais à la molette et n’est donc pas sujette à la fatigue de courbure. Par ailleurs plusieurs chercheurs soulignent que la résistance n’est pas uniforme sur toute la longueur du câble (Miscoe et McKewan, 1993 ; Smith et Koppe, 2008 ; Verreet, 2011).

Entretien des câbles

L’entretien régulier (lubrification) des câbles est essentiel afin de maximiser leur durée de vie. La lubrification peut prendre plusieurs formes (Babendererde et Pusch, 2007) et sert deux fonctions (HSE, 2004) :

1. Elle permet le mouvement libre des torons et ainsi réduit l’usure interne du câble ;
2. Elle protège le câble des éléments pouvant favoriser la corrosion.

5.1.2 Causes d'usure et de rupture des câbles

Le processus de dégradation des câbles dépend des conditions d'opérations (Slesarev et Vorontsov, 2012). Les principales causes de détérioration des câbles sont (Chaplin, 2008 ; HSE, 2004 ; Miscoe et McKewan, 1993 ; Verreet, 2011 ; Weischedel, 200b) :

- L'usure par abrasion ou déformation plastique ;
- La corrosion ;
- La fatigue ;
- La fragilisation de la surface ;
- Les dommages accidentels et la distorsion, conduisant à une détérioration localisée.

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur l'élaboration de modèles mécaniques visant à déterminer la résistance résiduelle des câbles en fonction du nombre de fils cassés (et donc d'une interprétation possible de test non destructif) (Vorontsov *et al.*, 2007). Verreet (1998) présente une méthode de calcul du nombre de cycles qu'un câble pourra supporter durant sa vie. Le principal critère de dépose des câbles est le nombre de fils cassés. Pour les câbles anti-giratoires, il a été remarqué que lors de la dépose, la perte de résistance était souvent supérieure à 10 % (Hecker, 1996).

Dans les mines, le mou de câble est probablement une des principales causes de rupture du câble (McLaughlin, 2013). Verreet (2011) souligne que lorsque les tensions sont généralement inférieures à 11 % de la charge à la rupture, le câble est plutôt sujet à une rupture de l'intérieur vers l'extérieur (sans signes apparents externes). Donc les installations où les câbles ont de larges FS sont plus exposées à ce genre de rupture, que les inspecteurs ne peuvent anticiper. La rupture survient le plus souvent dans les zones les plus sujettes à la fatigue et à l'abrasion (sauf intervention de facteurs externes) (Verreet, 2011). Parfois les ruptures surviennent subitement, car le câble casse « de l'intérieur vers l'extérieur », ce qui peut être le cas sur les câbles multi-torons (Verreet, 2011; Weischedel, 200a).

La surcharge, notamment à cause des charges dynamiques, est une des causes de rupture des câbles. Durant un accident de freinage avec une pleine application des freins sur le treuil, il est estimé que la surcharge dynamique sera de l'ordre de 60 % de la limite de rupture du câble (Hecker, 1996). Pour limiter les charges dynamiques dans le câble et abaisser le FS, on peut envisager d'utiliser un système de contrôle du freinage (Anon, 2013 ; Sparg, 1995). Les origines des charges dynamiques dans les câbles sont multiples (Beus *et al.*, 1997 ; Beus et McCoy, 1995 ; Beus et Ruest, 2002) :

- Oscillations électriques dans le moteur / commande ;
- Défaut de rotondité de la molette / tambour ;
- Élasticité du câble ;
- Chargement / déchargement du skip ;
- Courant d'air ;
- Défauts dans les guides (attention au désalignement / mauvais alignement des guides) ;
- Accident de freinage.

5.1.3 Suivi en continu des câbles d’extraction

Au moins deux principes différents, optique ou magnétique, permettent de suivre en continu l’état des câbles de treuils de mines. Ce type de suivi continu est nécessaire pour abaisser le FS à la molette en deçà de 5,0 au Québec (R-QC, 2014). Outre l’abaissement du FS, ces systèmes permettent également de répondre aux exigences en termes d’inspection visuelle journalière et mensuelle des câbles d’extraction (MegLab, 2013). Les systèmes électromagnétiques sont très similaires à ceux utilisés pour les tests réglementaires ponctuels. Ce type de système sera présenté en détail dans le volet 2. La principale différence est que les systèmes décrits dans cette section font de l’enregistrement continu et sont généralement munis d’alarmes ou de sécurités pour arrêter l’exploitation en cas de détection de problème grave (Ansys, 2014 ; Bestech, 2014).

Les systèmes à caméra se rapprochent d’une inspection visuelle classique (et obligatoire chaque jour) avec certains avantages : la vitesse du câble peut aller jusqu’à 20 m/s (au lieu de 2 m/s pour une inspection traditionnelle en Afrique du Sud), la localisation des défauts précise et peut-être suivie d’un jour à l’autre, des photos de chaque défaut sont prises et sauvegardées (Bestech, 2014). Par contre, ce système présente les mêmes défauts qu’une inspection visuelle, à savoir l’impossibilité de juger de l’état du câble en dessous des apparences (Haase *et al.*, 2010). Pour cette raison les tests destructifs restent indispensables (Udd, 2004). Un système d’inspection continue à caméra a été étudié par Haase *et al.* (2010). La détection automatique de défauts sur les câbles à l’aide de systèmes à caméra est une tâche relativement complexe (Platzer *et al.*, 2009).

5.2 Parachutes

5.2.1 Système traditionnel

Au Québec presque toutes les mines sont équipées de guides en bois et les cages, ou cages-skips sont munies de parachutes (Figure 4) qui sont actionnés lorsque le câble n’est plus sous tension. Les mâchoires sont tenues écartées par la tension du câble et dès lors que celle-ci est relâchée, elles viennent mordre le guide en bois sous l’effet d’un ressort et conduisent à l’arrêt de la cage. Dans les faits, les accélérations subies par les usagers seront vraisemblablement très grandes si la cage est en descente (tel que suggéré par les décélérations limites données dans certains règlements provinciaux). Ce système est très ancien (voir l’historique en 2.2) et nécessite le remplacement des guides s’il est utilisé pour un arrêt de chute. Par ailleurs, ce type de dispositif ne peut être installé que sur des guides en bois, car le freinage s’obtient par arrachement du bois via les mâchoires. De plus, la seule condition de déclenchement de ce système est l’absence d’un effort de traction suffisant dans le câble au niveau de la cage, ce qui se produit lorsque le câble se rompt (ou lors d’une décélération trop forte en montant – apesanteur temporaire).

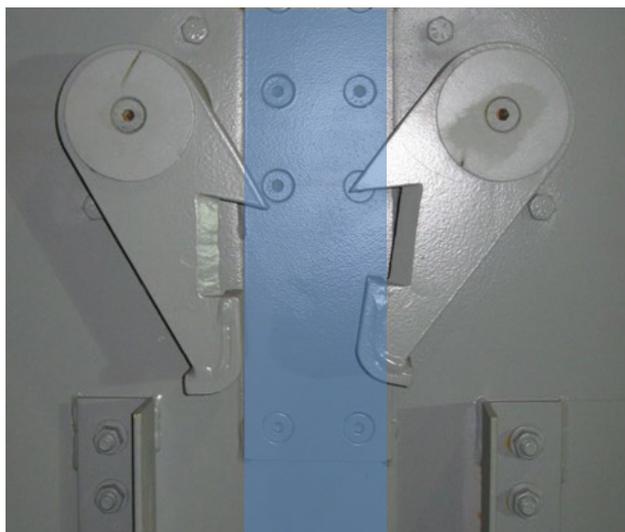


Figure 4. Parachutes typiques utilisés au Québec (en bleu la position du guide en bois).

Les parachutes traditionnels ont fait l'objet d'une attention particulière à la suite de l'accident de Paymaster en 1945. Parmi les recommandations faites par le comité ayant supervisé les travaux de recherche on peut noter (Young, 1947) :

- (9) le parachute ne doit pas s'appliquer intempestivement en cas de rebond de la cage ;
- (18) si possible, le parachute devrait s'enclencher lorsque la vitesse devient trop grande, plutôt que lorsque la tension est trop faible dans le câble ;
- (20) le parachute doit fonctionner en cas de problème au niveau du treuil ;
- (21) le parachute doit se mettre en fonction dès que la cage commence à tomber, avant d'avoir une vitesse trop grande.

Les recommandations (9) et (21) sont effectives par conception du mécanisme de parachute. Les recommandations (18) et (20) n'ont jamais été appliquées, car les parachutes traditionnels sont déclenchés par la rupture du câble. Les auteurs de l'étude de 1947 notent que sur 28 cas référencés où le câble a cassé, les parachutes ont fonctionné dans 18 cas (64 %). D'autre part, ils indiquent qu'à leur connaissance il n'y a pas de cas où l'arrêt, brutal, n'ait engendré de blessures sérieuses (Young, 1947). Sur les 10 cas où le parachute n'a pas fonctionné : il y en a 2 pour lesquels l'enclenchement des parachutes est la source de la rupture du câble, et 8 pour lesquels les câbles traînants font 200' à 4 000' (Young, 1947). Les câbles traînants représentent un des problèmes majeurs dans la conception des parachutes (Young, 1947). Par ailleurs, il faut noter que lorsque le câble cassé tombe sur la cage, un surplus de poids doit être repris par les parachutes, et souvent la chute du câble fait sortir les mâchoires des parachutes des guides en bois (Harrington et East, 1948).

À la suite de l'accident de Paymaster, de nombreux essais de chute ont été menés afin de s'assurer de l'efficacité des parachutes. Le rapport de Young (1947) recommande les points suivants pour le développement de nouveaux systèmes parachutes :

- La décélération maximale devrait être de 3 g, cependant lors de l'accident de Hallnor (1945) la décélération était de l'ordre de 4 g et seulement 4 des 9 mineurs ont souffert de blessures légères ;
- Éviter les câbles traînants, qui empêchent le déclenchement des parachutes ou les désengagent des guides après leur déclenchement.

Le problème de ces systèmes classiques est la décélération souvent importante qu'ils génèrent (en particulier pour une cage vide). En Ontario, un changement de réglementation a eu lieu un peu avant 1996, et limite la décélération à 2 g au lieu de 3 g précédemment (Mclvor, 1996). La décélération sera plus importante si la cage est vide (Gorzalczynski, 2002).

La vitesse de chute libre v est indépendante du poids, en chute libre sans frottement on a :

$$v = \sqrt{2gh} \quad (5.1)$$

Où g est l'accélération gravitaire terrestre, et h la hauteur de chute libre.

L'accélération moyenne a subie lors de l'arrêt de la cage est donnée par :

$$a = \frac{v^2}{2D_a} \quad (5.2)$$

Avec D_a la distance d'arrêt (une fois les mâchoires plantées dans les guides en bois).

Or la distance d'arrêt D_a est fonction du poids de la cage : plus la cage est lourde, plus D_a sera grand (pour une même vitesse). En utilisant les équations 5.1 et 5.2, on peut dire que, pour une hauteur de chute libre donnée, plus la cage est lourde, plus la décélération subie par la cage est faible. Ainsi, il pourrait être intéressant de mesurer la décélération moyenne lors de l'arrêt d'une cage presque vide (quelques personnes dedans seulement) lors du test de chute libre réglementaire.

Les résultats des essais de chute libre sont affectés par différents facteurs (Mclvor, 1996) :

- L'angle des dents ;
- Le périmètre de taille des dents dans le guide ;
- L'humidité des guides en bois ;
- Le grain des guides en bois ;
- La présence de nœuds.

Le système à une dent (Figure 4) préconisé à la suite de l'accident de Paymaster est celui présentant la plus haute fiabilité et la décélération peut être un peu ajustée en fonction de l'angle de la dent et de la profondeur de pénétration (Larsen *et al.*, 1972).

Les guides sont souvent en pin douglas (*BC douglas fir*), mais ce type de bois devient difficile à trouver et il est cher (McIvor, 1996). Le *karri wood* (eucalyptus diversicolor) devient de plus en plus populaire (c'est un bois plus dense), mais, comme le *BC fir*, il devient difficile à trouver (Tiley, 2011). Des essais ont été effectués sur du *parallam wood* (manufacturé) : ce matériau très homogène présente un bon comportement lors des tests, il faudra vérifier in situ s'il ne se dégrade pas trop avec l'humidité ambiante (McIvor, 1996). Les guides en aggloméré supportent mal l'humidité par contre, ils ont tendance à gonfler (Tiley, 2011). Une des limitations des parachutes traditionnels est l'utilisation de guides en bois. Or, l'industrie minière moderne tend à vouloir augmenter les charges, ce qui rend l'utilisation de guides en bois de plus en plus problématique (Gorzalczynski, 2002). Par ailleurs, les nœuds dans le matériau peuvent être très dangereux. Enfin, il faut également surveiller l'usure des guides : dans certains cas l'usure des guides ne permet pas d'être sûr de la performance des parachutes (c'est notamment l'une des causes de l'accident de Paymaster). Enfin, le déclenchement non souhaité du mécanisme est une source de dommages matériels et humains, et il faut faire attention à cette situation (Gorzalczynski, 2002)

5.2.2 Système « moderne »

L'industrie minière tend à utiliser des puits de plus en plus profonds, et cherche à lever des charges toujours plus lourdes. Ainsi, les guides en métal sont de plus en plus privilégiés, qu'ils soient fixes (fixés aux parois du puits) ou libres (câble-guide tendu par une masse accrochée en partie inférieure). Par ailleurs ces guides en métal permettent d'éviter les problèmes d'approvisionnement en bois (il faut des longueurs allant de 12 à 20 m, sans nœuds). Enfin, les guides en métal permettent aussi d'épargner l'abattage d'arbres parfois centenaires et de grande hauteur (Morrisson, 2009).

Le choix de guides en métal exclut l'utilisation de parachutes conventionnels. Le choix des guides en acier est expliqué pour deux raisons : (i) la difficulté à trouver du bois répondant aux exigences, (ii) l'utilisation d'un système de ventilation « *inshaft* » (l'air neuf est injecté dans la mine par le puits, ce qui a tendance à assécher le bois, car l'air est sec, surtout en hiver).

Néanmoins, au Québec, le RSSM impose un système de parachute, même si les guides sont en acier.

Certains fabricants de systèmes de positionnement (*chairing*, qui servent à éviter les mouvements verticaux du transporteur lors des phases de chargement ou déchargement) proposent une évolution de leur système de base, en ajoutant un accumulateur, par exemple d'air comprimé, afin d'être en mesure d'appliquer les mâchoires rapidement en cas d'urgence. En effet, l'approvisionnement en air comprimé se fait à chaque niveau pour le positionnement. Il inclut également des dispositifs de contrôle de la tension dans le câble.

Un essai de « chute libre » a été fait avec un de ces systèmes en Ontario (Lunderstedt *et al.*, 2012). Les critères réglementaires de l'essai de chute libre (R-ON, 2013) n'ont pas tout à fait été respectés : la cage était vide lors de l'essai, ce qui représente le cas où les accélérations seront les plus importantes (Anon, 2012a). L'accélération moyenne lors de la décélération de la cage était de 1,44 g, soit dans les valeurs limites de l'Ontario (entre 0,9 et 2 g). Il faut cependant noter que l'accélération maximale est montée jusqu'à 2,76 g. Le concepteur prévoit de faire de tests à pleine charge sur une structure de 30 m actuellement en construction dans leurs installations d'Afrique du Sud (Morrisson, 2013).

Parmi les avantages de ce système, on peut citer (Gorzalczynski, 2002) :

- La possibilité de décider quand activer le frein d’urgence ;
- La force de freinage peut être ajustée (on ajuste la pression sur les mâchoires).

Le principal risque de ce type de système, comme des parachutes traditionnels d’ailleurs, est qu’il se déclenche de manière intempestive et non contrôlée (McLaughlin, 2013). Quelques améliorations pourraient être apportées au système selon McLaughlin (2013) :

- Communication excellente avec la machine d’extraction ;
- Monitoring de la cage (position et vitesse) ;
- Recharge de la batterie en utilisant une dynamo.

Pour un second système, nous avons peu d’information indépendante : la plupart des informations présentées ont été fournies par le fabricant.

Ce système est prévu uniquement pour les cages, contrairement au système précédent qui est aussi conçu pour les skips (Tollinsky, 2007). Il présente également l’avantage de permettre un allègement de la cage d’environ une tonne (Tollinsky, 2007).

Par rapport au système précédent, le second système fonctionne en circuit fermé, et une batterie est présente dans la cage afin d’alimenter le compresseur d’air qui permet d’appliquer les freins sur les guides en acier (100-120 applications pour une charge). Un circuit fermé présente l’avantage d’éviter l’introduction de poussière ou autres éléments présentant un risque d’obstruction dans le circuit. Ce second système est conçu pour faire du positionnement (comme le premier), mais peut être converti en parachute par l’adjonction d’un accumulateur. Un accumulateur est présent sur la cage (comme pour le premier système) afin d’appliquer un frein d’urgence en cas de rupture du câble. Enfin, il fonctionne sans-fil contrairement au premier système. L’utilisation de ce type de système est très automatisée, et laisse peu de place aux erreurs humaines. Les sécurités évitant l’application intempestive des mâchoires sont implémentées dans le code du système d’exploitation et les ingénieurs concepteurs sont « confiants que l’application intempestive du freinage durant le déplacement de la cage n’est pas possible ». La conception est faite pour soutenir deux fois le poids de la cage à pleine charge.

Des essais de chute sont prévus durant le printemps ou l’été 2014 aux installations du fabricant. Ce système de parachute sera présenté plus en détail dans le volet [2](#) du mandat.

5.2.3 Friction wedge shoes

Proposés par un troisième fabricant, ces systèmes d’arrêt fonctionnent avec des guides en acier. Cependant le taux de décélération élevé de ces systèmes n’est pas complètement conforme aux réglementations de l’Ontario (Tiley, 2011). Ces systèmes ont été installés aux É.-U. où la réglementation est moins stricte qu’au Canada.

Une société chinoise fabrique également des systèmes fonctionnant sur des guides en métal. Le système peut aussi être adapté pour fonctionner sur des câbles guides. En cas de rupture du câble d’extraction, les mâchoires vont enserrer le câble et maintenir la cage sur les câbles guides.

Ce type de système est plus ancien que les systèmes précédents, et est issu des ascenseurs commerciaux. Le retour d'expérience est donc nettement plus important. Une des limitations est par contre le poids que ce type de système peut arrêter, il est donc réservé aux transporteurs relativement petits.

5.2.4 Synthèse

Les systèmes parachutes sur le marché peuvent être classés en trois catégories : traditionnels, « moderne » et *friction wedge shoes*. Cette dernière catégorie est, *a priori*, à écarter puisqu'elle est limitée en termes de poids. Pour le volet 2, seuls les parachutes traditionnels et « modernes » seront considérés. Le Tableau 2 présente une liste des avantages et inconvénients de ces deux systèmes.

Tableau 2. Avantages et inconvénients des systèmes parachutes

	Traditionnel (<i>safety dogs</i>)	Moderne
Avantages	Simplicité de fonctionnement Complètement autonome Système bien connu Facile d'entretien	Potentiellement plus léger Guides bois / métal Possibilité de contrôler le freinage (arrêt en douceur) Sert aussi à faire du positionnement
Inconvénients	Peu de contrôle sur la décélération Actif uniquement si rupture du câble Décélération assez brutale Dégradation des guides sur la distance d'arrêt Guides en bois uniquement	Plus cher qu'un système classique Entretien vraisemblablement plus compliqué Déclenchement possible en montée (à étudier)

6. ÉVÈNEMENT DANGEREUX : PERTE DE CONTRÔLE DU DÉPLACEMENT DE LA CAGE

Lorsque la cage est en montée ou en descente, avec un câble en bon état et connecté à la cage, et que le système de commande du treuil ne répond plus, il y a un risque d'écrasement de la cage, soit au fond du puits soit dans le chevalement. Deux possibilités existent pour freiner une cage dans un puits de mine. Soit le freinage, de service ou d'urgence, est effectué par le treuil, soit le freinage d'urgence (*safety dogs*) est effectué par la cage (section 5.2). L'étude détaillée des solutions pour éviter la perte de contrôle du déplacement de la cage sera présentée dans le volet [3](#) du mandat.

6.1 Moyens de freinage du treuil et du câble

En règle générale on doit avoir deux systèmes de freinage indépendants sur les machines d'extraction, pouvant chacun arrêter la cage tout en contrôlant la décélération (Galloway et Tiley, 1986). Ces freins assurent deux fonctions : freinage de service et freinage d'urgence. Ces systèmes de freins sont dimensionnés pour retenir deux fois la charge maximale au fond du puits (Galloway et Tiley, 1986). En termes de décélération, une personne en bonne santé peut subir sans problèmes des décélération de 20 ft/s^2 (0,6 g). Les guides du New South Wales contiennent beaucoup d'information sur les tests de freinage et ces guides seront discutés dans le volet [3](#).

6.1.1 Freins mécaniques (*tambour / disque*)

Les freins mécaniques ont deux fonctions (ABB, 2014 ; Barkand, 1992b ; Galloway et Tiley, 1986) :

- Amener la cage à l'arrêt complet en utilisation courante. Le frein est alors enclenché à faible vitesse (ou à l'arrêt) ;
- Arrêter rapidement la cage dans les situations d'urgence.

La difficulté lors de la conception du système de freinage mécanique d'une machine d'extraction consiste à choisir une capacité de freinage suffisante pour une utilisation à pleine charge sans pour autant engendrer des arrêts trop brutaux lorsque la cage a peu de travailleurs (Barkand, 1992b).

Les premiers systèmes de freinages mécaniques étaient des freins à tambour fonctionnant généralement à l'air comprimé ou avec de l'huile sous pression (ABB, 2014). Aujourd'hui des systèmes de freins hydrauliques à disque sont utilisés pour les nouvelles installations (Leonida, 2013). Il est possible de mettre en place des systèmes de freinage qui contrôlent la décélération (ABB, 2014 ; Sparg, 1995).

6.1.2 Frein dynamique

Une des solutions permettant d'éviter les cas de survitesse en descente ou en montée (pour les treuils à friction) est le freinage dynamique (Barkand, 1990 ; Barkand, 1992a). Le frein dynamique consiste à placer une charge résistive dans le moteur afin d'éviter qu'il ne s'emballe pas. Ce type

de frein fonctionne avec les moteurs à courant continu. Il peut de plus être conçu pour fonctionner même en cas de coupure de courant. Enfin, ce type de frein ne permet pas de stopper complètement le transporteur, il vise juste à limiter sa vitesse, ce qui accroît l'efficacité des autres systèmes de freinage (Barkand, 1990; Barkand, 1992a). L'avantage du freinage dynamique est qu'il permet de réduire beaucoup la vitesse et donc de n'utiliser les freins mécaniques que pour l'arrêt complet de la cage à basse vitesse (ou éventuellement en conditions d'urgence). Barkand présente une revue détaillée des grands types de systèmes de freinage dynamique. Il conclut que ce système permet d'augmenter la marge de sécurité à un coût très limité et qu'il complète très avantageusement le frein mécanique (Barkand, 1992b).

L'un des défauts de ce type de freinage est qu'il n'est pas *failsafe* (sécuritaire en cas de défaillance), il fonctionne à deux conditions : (i) les contrôleurs de champ du moteur et du générateur sont des éléments passifs, (ii) l'énergie rotationnelle de la génératrice principale est disponible pour maintenir l'alimentation en courant du contrôleur (Galloway et Tiley, 1986).

6.1.3 Frein de câble

La première mise en place de frein sur le câble unique d'une machine d'extraction à tambour remonte à 1992 aux États-Unis (Barkand, 1992b ; Barkand, 2002). Ce type de frein secondaire est plutôt utilisé sur les machines à friction multicâbles, et est utile pour éviter les accidents d'écrasement de la cabine au niveau du chevalement. Bien que ce type de freins soit efficace, l'autorité de sécurité minière de Pennsylvanie a refusé d'approuver son installation pour les câbles uniques, du fait de l'usure très marquée des garnitures de frein (Barkand, 2002). Par ailleurs, sur les machines à tambour, les câbles sont régulièrement lubrifiés, ce qui peut allonger la distance de freinage. Par contre, sur les machines d'extraction à friction comportant plusieurs câbles, les freins de câble ont été testés avec succès (Barkand, 1990; Barkand, 1992a).

6.2 Système de surveillance (*monitoring*) globale

Afin d'assurer la sécurité du système d'extraction au complet, certains chercheurs proposent une surveillance globale des composantes du système et une gestion par ordinateur des données afin de prendre les décisions adéquates.

Le système de surveillance globale inclut les composantes suivantes (Beus et Ruest, 2002) :

- Cellule de charge pour mesurer la tension dans le câble ;
- Positionnement (avec *checkpoints*) et vitesse de la cage ;
- Potentiomètre pour mesurer l'alignement des guides (*shaft guide gage*), au-delà de ± 8 cm, une alarme est envoyée à l'opérateur ;
- Détecteur de température dans le puits ;
- Jauge de courant DC (sur le moteur du treuil) ;
- Accéléromètre multi-axes ;
- Microprocesseur pour le traitement des informations et transmetteur radio sur la cage pour envoyer les données vers le haut du puits.

Certains chercheurs ont étudié les avantages et défauts des différents types de senseurs pour surveiller la position et la vitesse de la cage (Kovalchik et Duda, 1995).

L’idée du monitoring de la vitesse et de la position de la cage n’est pas récente. Déjà en 1947, l’idée d’utiliser un limiteur de vitesse (*speed governor*) similaire aux ascenseurs civils était suggérée, mais son application était impossible du fait des très longs câbles (*governor rope*) nécessaires (Young, 1947).

6.3 Systèmes de commande du treuil / de la cage

La problématique de la fiabilité des systèmes de commande des treuils est connue depuis les débuts des années 1900, et le système de commande mécanique fiable le plus courant est le système Lilly (Fortin et Demers, 2011). C’est un contrôleur de sécurité électromécanique qui autorise l’utilisation sans entrave du treuil tant que certaines caractéristiques de vitesse et de positionnement restent à l’intérieur d’un gabarit de fonctionnement. Si une limite est dépassée, un avertissement est donné. Si l’opérateur ne réagit pas dans un délai donné, le contrôleur Lilly ouvre le circuit de sécurité qui coupe l’alimentation du moteur et applique les freins.

Depuis, les systèmes de commande sont devenus électriques puis électroniques. La fiche technique RF-412 de l’IRSST publiée en 2005 (Paques et Germain, 2005) aborde cette nouvelle réalité sous l’angle de la sécurité des machines. Cette fiche technique est mentionnée dans le RSSM à l’article 216.1 et elle a été mise à jour en 2019 pour devenir la RF-1049 (Giraud *et al.*, 2019a ; Giraud *et al.*, 2019b). Par ailleurs, plusieurs normes internationales traitent de la question de la fiabilité des systèmes de commande électriques et électroniques, ou des systèmes de commande mixtes (électromécaniques, électrohydrauliques, etc.) : (IEC 61508:2002, 2002 ; ISO 13850, 2006 ; ISO 13849, 2006).

Le fonctionnement de l’arrêt d’urgence disponible minimalement au poste de commande du treuil est souvent régi par un code ou une norme (RSSM, art. 232 et 233 ; MDG 33.6, etc.), mais des différences peuvent exister sur la fréquence des tests. Peu de législations traitent spécifiquement de cet aspect de la sécurité hormis le New South Wales en Australie par le biais de son brouillon de guide MDG 33.6 « Mine Winders Part 6: Control Systems » (R-NSW, 2011b) devenu « Part 5 : Winder control systems - Technical reference guide - Powered winding systems » (TRG Part 5, 2020). Cet aspect de la sécurité des treuils sera traité plus en détail dans le volet [3](#) de cette expertise.

7. LÉGISLATIONS RELATIVES AUX PARACHUTES ET CÂBLES D’EXTRACTION

7.1 Généralités

Afin d’alléger le texte, les réglementations provinciales relatives au secteur minier seront notées comme suit : « *R-indicatif postal de la province* » (ainsi R-QC fait référence au règlement minier en vigueur au Québec). Cette section présente une synthèse des principaux points communs ou différences entre les législations provinciales canadiennes. Cependant, dans certains cas jugés pertinents, des comparaisons sont faites avec des législations en vigueur à l’étranger.

Au Canada : Sur les 13 provinces et territoires du Canada, seules 11 législations sont comparées : l’île du Prince-Édouard a été écartée et la législation en vigueur en Alberta n’a pu être trouvée. Les tableaux comparant précisément les prescriptions réglementaires des provinces et territoires canadiens sont présentés en annexe III. Les comparaisons portent essentiellement sur les articles traitant des parachutes (*safety catches*) et des câbles d’extraction (*hoist ropes*).

Aux États-Unis : il y a une réglementation fédérale, 7 états y renvoient directement, 14 états ont des réglementations spécifiques approchantes, le reste des états ne propose pas de réglementation spécifique pour les mines. La réglementation de la Californie a été étudiée de plus près puisque c’est un des états où elle est la plus détaillée et qu’elle présente la particularité d’exiger la présence de parachutes durant le fonçage du puits.

Seules les réglementations du Western Australia et New South Wales ont été étudiées en détail pour l’**Australie** : ce sont deux provinces australiennes ayant des réglementations minières assez détaillées. Ces réglementations font fréquemment référence aux normes australiennes AS (AS 3785.6, 2092 ; AS 3785.8, 2094 ; AS 3785.5, 2098 ; AS 3785.4, 2002 ; AS 3785.3, 2005 ; AS 3785.1, 2006 ; AS 3785.2, 2006 ; AS 3785.7, 2006). La norme AS 3785.6 (1992) limite la déflexion des guides à 0,003 fois l’espacement entre les points d’appui ou 25 mm, afin d’éviter les accélérations horizontales. Par ailleurs la même norme fixe des limites concernant les caractéristiques d’usinage des guides en bois. La norme AS 3785.7 (2006) se concentre uniquement sur les molettes. La norme AS 3785.8 (1994) exige la présence de boutons d’arrêt d’urgence dans la cage (norme relative aux cages pour les puits non verticaux).

Au Royaume-Uni et en Allemagne : il n’y a pas d’obligation réglementaire concernant les parachutes. Comme mentionné précédemment, les parachutes sont plutôt une spécificité nord-américaine (mais *a priori* les treuils à friction sont plus courants en Europe). En Afrique du Sud, les cages ne sont pas équipées de parachutes (McLaughlin, 2013).

Dans cette section, les législations seront discutées dans l’ordre suivant : Canada, États-Unis, Australie, autres pays.

7.2 Systèmes parachutes

7.2.1 Parachutes

Les parachutes sont obligatoires dans tous les provinces et territoires du **Canada**, pour le transport de travailleurs, dans le cas où la cage n'est retenue que par un seul câble ou un seul point d'attache (à l'exception des treuils à friction pour le Nunavut et les Territoires du Nord-Ouest⁷). Pour beaucoup de provinces (7/11) le système de parachute doit être validé par un ingénieur/inspecteur ou répondre à des critères de conception de bonne ingénierie.

En 1947 les parachutes n'étaient pas obligatoires dans toutes les provinces (Young, 1947) : en Alberta, car les mines de charbon étaient peu profondes ; en Ontario, au Manitoba, en Colombie-Britannique et en Nouvelle-Écosse sur permission écrite du *Deputy Inspector / Inspector / Chief Inspector*. Par ailleurs, en Ontario, au Manitoba et en Colombie-Britannique, si des parachutes étaient installés, il fallait effectuer un test de fonctionnement mensuel (pas précisions sur la nature du test). Au Québec les parachutes étaient obligatoires en 1947.

Aux États-Unis, au niveau fédéral les parachutes sont également obligatoires, ou éventuellement remplacés par un système jugé aussi efficace (Strickling, 2008). Plus particulièrement en **Californie** les parachutes sont obligatoires également lors du fonçage du puits §7132. Le rapport de Young (1947) répertorie 7 états qui citent spécifiquement les parachutes. À la même époque, le U.S Bureau of Mines *recommande* l'utilisation de parachutes.

Au Western Australia : les parachutes ne sont pas mentionnés explicitement, mais il faut un système qui arrête la cage en cas de défaillance du câble ou de la machine (R-WA, 2013), ou un système de détection de mou de câble. Il y a également une obligation d'avoir un système de chaises pour le chargement / déchargement de lourdes charges (R-WA, 2013). La norme AS 3785.3 (2005) décrit les critères de conception et d'essais des parachutes (*gripper systems*). Cette norme ne s'applique pas pour les treuils à friction ou les puits qui utilisent des guides en câble ou en acier (AS 3785.3, 2005). Au New South Wales, dans le guide MDG 33.3, mentionne la nécessité d'un système de parachute, mais uniquement pour le cas d'*overwinding* (R-NSW, 2011a).

En **Nouvelle-Zélande** un système de sécurité contre l'*overwinding* est aussi obligatoire.

7.2.2 Essais réglementaires

Les essais réglementaires à effectuer sur les parachutes vont de la simple inspection visuelle, au test de chute libre (avec un niveau d'exigences croissant pour passer ces différents tests). Les définitions de ces essais varient parfois d'une province à l'autre, et dans certains cas, le type d'essai n'est pas défini très précisément. Par exemple, pour l'essai de dégagement rapide au Québec, le RSSM ne précise pas quelle doit être la charge de la cage (R-QC, 2014). On peut cependant noter que le Guide sur les machines d'extraction de la CSST indique : « L'essai de dégagement rapide consiste à lâcher brusquement la cage ou le skip vide de sa position stationnaire. » (Fortin et Demers, 2011). Les exigences d'essais pour chacune des provinces et

⁷ 11.51. A cage that is used for the transport of persons in a shaft shall (a) where it is supported by a single rope or a single point of attachment, be equipped with safety catches except on a friction hoist system where safety catches shall not be required.

territoires du Canada sont présentées dans le Tableau 3. Le Tableau 3 montre que si l’inspection visuelle est exigée dans toutes les provinces, les essais de débattement ne le sont pas. Nous avons considéré qu’un essai de débattement était nécessaire lorsqu’apparaissaient les mentions « bien ajustés » et « fonctionnent librement » en référence à l’inspection des parachutes (en anglais « *proper adjustment* » et « *proper operating conditions* » ou « *working conditions* »). Par contre aucune des provinces ne détaille la portée de l’essai de débattement. Deux cas particuliers sont identifiés dans le tableau 3 (R-SK, 2004 et R-NS, 2008).

Les sections suivantes et l’annexe III détaillent plus spécifiquement les caractéristiques de chacun des essais présentés dans le tableau 3.

Les essais de dégagement rapide (*drop test*) sont caractérisés par une vitesse initiale nulle, contrairement aux essais de chute libre, qui ont une vitesse initiale différente de 0. Les définitions précises de chacun de ces essais sont données dans l’annexe I de ce rapport.

Tableau 3. Essais réglementaire exigés dans chaque province pour les parachutes

Province	Inspection visuelle quotidienne	Essais débattement limité	Essai débattement total	<i>Drop test</i> à vide	<i>Drop test</i> pleine charge	Chute libre (charge max)
Caractéristiques essai		Guide sans encoche	Encoche dans le guide	V = 0	V = 0	V > 0
(R-QC, 2014)	X	? ← X → ?		? ← X → ?		X
(R-ON, 2013)	X	-	-	X	-	X
(R-AB, 2003)	-	-	-	-	-	-
(R-SK, 2003)	X	? ← X → ?		-	X « <i>free fall</i> »	-
(R-YT, 2002)	X	-	-	X	-	X
(R-NT, 2003)	X	-	-	X	-	X
(R-BC, 2008)	X	-	-	X	X	X
(R-NB, 2011)	X	-	-	X	-	X
(R-NS, 2008)	X	-	-	? « Fonctionne correctement »		X
(R-MB, 2011)	X	? ← X → ?		? ← X → ?		X
(R-NU, 2014)	X	-	-	X	-	X
(R-NL, 2012)	X	? ← X → ?		? ← X → ?		?

7.2.3 Inspection

Les provinces sont unanimes pour l’inspection des parachutes : elle doit être faite chaque jour où la mine est opérationnelle. Par contre, les modalités de cette inspection sont souvent floues : s’agit-il uniquement d’une vérification visuelle, ou doit-on faire un essai de débattement des mâchoires des parachutes (en mettant la cage sur les chaises) ?

Aux **États-Unis** également, les parachutes doivent être inspectés chaque jour où la mine est en fonction (R-Ca, 2014 ; R-USA, 2014 ; Strickling, 2008).

7.2.4 Essai de dégage­ment rapide

Les essais de dégage­ment rapide doivent être faits régulièrement, en général tous les trois mois (8/11). Par contre les réglementations ne donnent pas nécessairement d'information sur la charge de la cage (vide ou à pleine charge). Dans les provinces anglophones, les essais de dégage­ment rapide sont appelés « *quick release test* » ou parfois « *drop test* ».

Trois provinces diffèrent significativement des autres :

1. Le Yukon, où les essais de dégage­ment rapide sont faits tous les six mois (R-YT, 2002) ;
2. La Nouvelle-Écosse, où il faut s'assurer que les parachutes « fonctionnent correctement » (R-NS, 2008) ;
3. La Colombie-Britannique, où des essais de dégage­ment rapide sont faits tous les mois à vide, et une fois par an à pleine charge (R-BC, 2008).

Aux **États-Unis**, la réglementation fédérale impose un essai de dégage­ment rapide tous les deux mois (R-USA, 2014). Plus particulièrement, en **Californie**, les essais de dégage­ment rapide doivent être faits lorsqu'ils sont demandés par la Division of Industrial Safety, en présence d'un de ses représentants (R-Ca, 2014). Plusieurs méthodes pour effectuer des essais de dégage­ment rapides sont présentées dans des rapports de l'U.S. Bureau of Mines (Pearce et Cash, 1945 ; Sloman, 1944).

7.2.5 Essai de chute libre

Toutes les provinces prescrivent un essai de chute libre lors de l'installation des parachutes ou lorsqu'une modification est apportée à ce système. Les caractéristiques de cet essai de chute libre varient d'une province à l'autre : cage à pleine charge ou vide, cage au repos (sic), à vitesse normale ou à vitesse maximale (ou vitesse équivalente à celle atteinte après 1,5 m de chute libre). Pour Terre-Neuve-et-Labrador, plusieurs essais de chute libre devaient être faits selon le brouillon de 2010 (dans la version actuelle, il n'y a pas d'indication sur les essais de chute libre) (R-NL, 2010 ; R-NL, 2012). La plupart des provinces (9/11) prévoient un intervalle de valeur de décélération acceptable pour les essais de chute libre : 7/9 acceptent entre 1 g et 3 g, et 2/9 acceptent entre 0,9 g et 2 g. Au Québec il n'y a pas de valeurs d'accélération limite prescrites par le RSSM, bien que le guide de la CSST sur les machines d'extraction indique que les décéléra­tions seront de l'ordre de 1 g à 3 g (Fortin et Demers, 2011). Enfin, pour certaines provinces, un rapport d'essai doit être remis à l'inspecteur. Le cas de la Saskatchewan est très particulier puisque leur « *free fall test* » se fait à pleine charge et à vitesse initiale nulle (R-SK, 2003). Cet essai s'apparente donc plutôt à un essai de dégage­ment rapide.

Il est à noter qu'en Australie, la norme AS3785.2 (2006) prescrit des décéléra­tions maximales de 1 g en montée et 2 g en descente pour les « *shaft winding arresting systems* ». La norme AS3785.3 (2005) prescrit deux essais de chute libre : un à charge maximale et un à vide. Par contre il n'est pas précisé si ce test de chute libre se fait à vitesse initiale nulle ou non.

7.3 Câbles

7.3.1 Facteurs de sécurité

Les facteurs de sécurité des câbles sont globalement les mêmes dans toutes les provinces : 8,5 (9/11, pas d'indication sur le FS au Yukon et à Terre-Neuve-et-Labrador) au niveau de la cage du transporteur (7,5 s'il s'agit d'un skip et que le poids est contrôlé) et 5,0 (7/11, pas d'indication sur le FS au Yukon et à Terre-Neuve-et-Labrador) au niveau de la molette. Le Manitoba (R-MB, 2011) et la Saskatchewan (R-SK, 2003) exigent des facteurs de sécurité de 6,5 au niveau de la molette si les cages ne sont pas équipées de parachutes (le parachute est obligatoire pour les cages dont l'installation est postérieure au 1^{er} janvier 1979 à la Saskatchewan), 5,25 sinon.

Enfin, seules trois provinces, le Québec, l'Ontario et le Manitoba (R-MB, 2011), autorisent des facteurs de sécurité inférieurs à 5,0 à la molette sous réserve du respect de deux normes sud-africaines portant respectivement sur l'évaluation de la condition des câbles (CSST, 2003a) et les performances, les essais et l'entretien des machines d'extraction à tambour du point de vue de la sécurité des câbles d'acier (CSST, 2003b). Outre le respect de ces deux normes, le Québec exige l'utilisation d'un dispositif de supervision de l'état du câble en continu (R-QC, 2014). Il est à noter que la norme SABS0294 exige un système de suivi continu de la tension dans le câble (6.1.1.). Ces modifications apportées au RSSM ont été demandées pour la mine La Ronde à la fin des années 1990 (McLaughlin, 2004b). Le coefficient de sécurité du skip répond aujourd'hui aux normes SABS293 et 294 et un inspecteur de niveau 1 est responsable de l'inspection des câbles (McLaughlin, 2004b).

La réglementation fédérale aux **États-Unis** impose un FS minimal de 4,0 à la molette pour les câbles dont la longueur dépasse 3 000'. À ce coefficient de sécurité s'ajoutent des décélérations limites : 4,9 m/s² pour un freinage d'urgence, 1,83 m/s² pour les freinages en opération normale (R-USA, 2014). En **Californie**, le FS à la molette varie en fonction de la longueur du câble : 8,0 pour un câble de moins de 500', 5,0 pour un câble de plus de 2 000' (R-Ca, 2014).

En **Afrique du Sud**, le FS minimal à la molette est fixé à 4,275 pour les treuils Blair (Regulation 16.37, Mine Health and Safety Act) (McLaughlin, 2004b).

7.3.2 Entretien des câbles d'extraction

Les réglementations provinciales ne varient pas trop : il faut nettoyer et lubrifier le câble d'extraction aussi souvent que nécessaire, et la plupart des provinces (7/11) imposent un nettoyage minimalement une fois par mois. Terre-Neuve-et-Labrador fait encore là exception et l'article 92, du brouillon de 2010, indique seulement qu'un plan d'inspection et d'entretien doit être établi et soumis au ministère (R-NL, 2010), l'entretien des câbles d'extraction n'est pas discuté dans la réglementation en vigueur (R-NL, 2012).

En **Californie** la réglementation demande de garder le câble bien lubrifié et d'utiliser un produit antiacide si le câble est en service dans un lieu propice à la corrosion (R-Ca, 2014).

Pour le **New South Wales**, le guide MDG33.3 indique de faire attention à la lubrification (R-NSW, 2011a).

Au **Royaume-Uni**, le guide HSE (2004), les câbles d'extraction des treuils à tambour devraient être lubrifiés au moins une fois par semaine pour les puits humides.

7.3.3 Inspection des câbles

De manière générale (10/11), une inspection visuelle quotidienne (pouvant être remplacée par un dispositif de suivi continu ou un test électromagnétique au Québec) est nécessaire et une inspection plus précise est requise une fois par mois. Au Manitoba cette inspection mensuelle peut être remplacée par une inspection hebdomadaire, mais avec une vitesse de déroulement du câble plus rapide (R-MB, 2011).

Aux **États-Unis** et au **Royaume-Uni** également, les câbles doivent être inspectés chaque jour où la mine est en fonction (HSE, 2004 ; Strickling, 2008). L'inspection quotidienne est une des recommandations du comité scientifique ayant enquêté sur l'accident de Paymaster en 1945 (Young, 1947).

7.3.4 Tests électromagnétiques des câbles d'extraction

Le test électromagnétique d'un câble est un test non destructif, c'est-à-dire que le câble n'est pas dégradé par la mesure. Ces essais permettent de s'assurer de l'intégrité structurelle du câble, y compris pour les parties non visibles (voir section 5.1.1). Pour la plupart des provinces (9/11) le premier test électromagnétique doit être fait dans les 6 mois suivant la mise en service du câble (dans les 4 mois pour la Nouvelle-Écosse, et pas d'indication pour Terre-Neuve-et-Labrador). Par la suite les tests doivent être faits tous les 6 mois (5/11) ou tous les 4 mois (5/11) et à des fréquences plus élevées si une faiblesse est détectée, ou qu'une réduction de 10 % de la résistance est anticipée (voir tableau en annexe III).

Au **New South Wales**, les tests électromagnétiques doivent être faits tous les 6 mois durant les trois premières années, puis à des intervalles plus rapprochés lors du vieillissement du câble. Si un affaiblissement du câble ou de la corrosion sont suspectés, les tests doivent être effectués plus fréquemment (R-NSW, 2011c). Enfin, le guide MDG 33.7, devenu « Part 4 : Ropes - Technical reference guide - Powered winding systems » (TRG Part 4, 2020) indique de faire un premier test dans les 4 semaines qui suivent l'installation afin d'établir un profil de référence du câble. L'appareillage utilisé pour ce type de test doit être capable de détecter des pertes de section de l'ordre de 0,5 %.

7.3.5 Essai destructifs des câbles d'extraction

L'essai de rupture d'un câble est un test destructif qui permet de connaître les caractéristiques de résistance du câble : force de rupture, allongement sous la charge, etc. Ce test rend le câble testé (la portion testée) inutilisable. Les intervalles de temps entre les essais varient fortement d'une province à l'autre, mais les câbles d'extraction restent particulièrement suivis. Dans la plupart des provinces (7/11), les résultats de ces essais doivent être envoyés à l'organisme de contrôle (équivalent de la CSST), ce qui n'est pas mentionné dans le RSSM (R-QC, 2014). Par contre, étant donné que les inspections des mines sont fréquentes et que les rapports détaillés

doivent être gardés sur le site de la mine, il paraît très probable que les inspecteurs regardent ces résultats d’essais. Pour les essais de rupture il existe une norme CSA « *Steel Wire Rope for General Purpose and for Mine Hoisting and Mine Haulage* » (CAN/CSA-G4, 2009), mais cette norme est seulement citée dans les règlements de 4 provinces : Manitoba, Terre-Neuve-et-Labrador, Ontario et Nouveau-Brunswick. Cependant beaucoup d’autres provinces demandent des essais de rupture très similaires à celui de la CAN/CSA-G4 : Saskatchewan, Yukon, Territoires du Nord-Ouest, Nunavut, Colombie-Britannique. Seules deux provinces donnent assez peu d’information sur les caractéristiques des essais de rupture : le Québec et la Nouvelle-Écosse.

Tableau 4. Caractéristiques des essais destructifs des câbles dans les provinces n’exigeant pas le respect de la norme CAN/CSA G4

Province	QC	SK	YT	NT/NU	BC	NS
Longueur	2,5 m					
Charge rupture	X	X	X	X	X	X
Élongation à la rupture		X	X	X	X	
Essai torsion	X	X	X	X	X	
Lubrification		X		X		
Condition du câble		X		X		
Labo approuvé/acceptable		X		X	X	

Caractéristiques générales des essais destructifs selon la norme CAN/CSA G4 :

- Longueur échantillon = 2,44 m (8 pi) ;
- Caractéristiques précises pour le « grippage », la coupe, étiquetage, emballage ;
- Nettoyage : enlever dépôt excessif de graisse / impuretés, pas de nettoyeur haute pression / produit chimique, doit conserver lubrification d’origine du câble ;
- Échantillon testé : 2 083 mm (82 po), distance entre les points de grippage = 1 575 mm, charge à vitesse constante de 10,2 mm/min, on commence à 15 % de la charge, on repart vers 0 et on trace la courbe ensuite (jusqu’à 20 % sous la charge de rupture), noter nombre torons rompus ;
- Échantillon de 254 mm (10 po), essai de torsion, avec fil intérieur et un fil extérieur de chaque toron, fils coudés à 90 ° à 1 po de l’extrémité, distance mini entre les étaux = 203 mm, fil en traction, puis on tourne à 60 tr/min jusqu’à la rupture, on compte le nombre de tours, puis conversion en tr/100 diam ;
- Examen visuel (échantillon de 2 083 mm) : on ouvre le câble complètement et on vérifie sa structure interne + lubrification ;
- Appareillage d’essai certifié ASTM E74 ;
- Fournir un certificat d’essai (détails de formatage et éléments nécessaires) ;
- Assurance qualité du laboratoire.

Le seul laboratoire d’essai agréé au Canada est celui de Sudbury, qui fait les essais destructifs selon la norme G4. Ceci expliquerait pourquoi la plupart des provinces donnent relativement peu de détails dans leurs réglementations.

Au **New South Wales**, pour les treuils à friction, le premier essai de rupture est fait au bout de 5 ans, et les suivants tous les 3 ans environ (R-NSW, 2011c).

7.3.6 Critères de retrait des câbles

Les critères de retraits des câbles sont multiples, mais relativement similaires d'une province à l'autre. Il faut noter que deux provinces ne donnent pas de critères de retraits des câbles : le Yukon et Terre-Neuve-et-Labrador. Pour le Yukon, c'est simplement, car leur province n'a pas de mine souterraine en activité. Pour 8 provinces sur 11, les trois principaux critères sont :

- La charge à la rupture (moins de 90 % de la charge à la rupture pour le câble neuf) ;
- Le nombre de fils cassés (plus de 5 % de fils cassés sur un pas de toron) ;
- L'élasticité (moins de 60 % de l'allongement pour une patte du câble neuf).

À ces trois critères principaux s'ajoutent d'autres critères, qui varient d'une province à l'autre :

- Résistance à la torsion inférieure à 85 % du câble neuf (R-QC, 2014), ou « *considerable loss* » (R-NT, 2004 ; R-ON, 2013) ;
- Durée de vie maximale de 2 ans, ou validation du *Chief Inspector* (R-NT, 2004 ; R-SK, 2003) ;
- Corrosion marquée (3/11) ;
- Défaut mettant en jeu la sécurité (3/11).

La norme SABS0293 définit des critères de retraits spécifiques à chaque type de câble et sera discutée plus en détail dans le volet [2](#).

En **Californie**, les critères de retrait des câbles sont les suivants (R-Ca, 2014) :

- Diminution de la résistance à la rupture : 80 % pour les câbles de moins de 500', 86 % pour les câbles de plus de 2 000' (et 90 % pour les câbles de plus de 3 000' selon Walker et Stahl (1961)) ;
- Corrosion marquée ;
- 6 torons de cassés sur un pas de câble ;
- Critères de perte de section / usure.

Au **Western Australia**, il y a deux critères : la résistance à la rupture, et une inspection non destructive qui montre un risque pour l'exploitation (R-WA, 2013). Pour le New South Wales il y a un très grand nombre de critères (R-NSW, 2011c).

La norme **ISO 4309** permet de considérer l'effet cumulatif des dégradations observées sur le câble (ISO 4309, 2010). En effet, cette norme suggère d'associer un degré de sévérité à chaque dégradation observée et d'additionner les degrés de sévérité par la suite (annexe F, informative). Si l'on atteint 100 %, le câble doit être déposé, même si aucun des critères individuels n'a été atteint. Par exemple, pour un câble avec une diminution de diamètre conduisant à degré de sévérité = 40 % et de la corrosion externe suffisamment prononcée pour que la surface soit rugueuse au touché (degré de sévérité = 60 %), on atteint un degré de sévérité résultant de 100 %, qui suggère la dépose du câble.

8. CONCLUSIONS

Ce rapport a présenté une revue générale des accidents liés au transporteur. Il apparaît que la plupart des mines au Québec sont équipées de treuils à tambour, et leurs cages doivent en conséquence être équipées de parachutes. Les ruptures de câbles sont beaucoup moins fréquentes aujourd'hui qu'elles n'ont pu l'être dans la première moitié du XX^e siècle. En effet, avec l'évolution des techniques de surveillance de l'état du câble et les progrès réalisés dans la fabrication des câbles, on a pu remarquer que très peu des accidents des 30 dernières années sont liés à une rupture de câble. L'Amérique du Nord est d'ailleurs une des dernières régions au monde à imposer l'usage de parachutes alors que ceux-ci ne sont plus obligatoires en Afrique du Sud (plus important pays minier au monde). Néanmoins, dans le cas d'une rupture du câble, les parachutes représentent la dernière sécurité empêchant l'aggravation des conséquences de la rupture du câble, soit l'écrasement de la cage.

Des arbres de défaillance ont été introduits afin d'identifier les causes (ou enchaînement de causes) conduisant à un écrasement de la cage dans le cas d'une rupture de câble ou de la perte de contrôle du déplacement de la cage. Ces arbres de défaillance seront détaillés et les coupes minimales seront présentées dans les volets [2](#) et [3](#) du mandat.

Les sections 5 et 6 de ce rapport ont présenté un bref état de l'art concernant les moyens permettant d'améliorer la sécurité des transporteurs de mines dans le cas d'une rupture de câble ou de la perte de contrôle du déplacement de la cage. Les éléments discutés dans ces sections seront approfondis dans les volets 2 et 3 du mandat. Pour le cas de la rupture de câble, on a pu remarquer que les câbles ont été l'objet d'une attention particulière au cours des dernières décennies en termes de recherche et développement. L'avenir s'ouvre sur des câbles hybrides (voire 100 % synthétiques à plus long terme) moins sujets à la corrosion. Les techniques de suivi continu devraient également permettre de mieux anticiper la fatigue et la rupture éventuelle des câbles. Concernant les parachutes, le système utilisé actuellement est relativement ancien : sur le principe on se rapproche du système imaginé par M. Fontaine au milieu du XIX^e siècle, et la conception actuelle s'appuie sur des essais effectués dans la deuxième moitié des années 40, à la suite de l'accident de Paymaster. Des systèmes modernes fonctionnant sur des guides en métal sont proposés par deux fabricants au Canada. Une revue détaillée de ces systèmes sera présentée dans le volet 2 du mandat. Pour le cas de la perte de contrôle du déplacement de la cage (sans rupture du câble d'extraction) l'état de l'art a pour l'instant été moins approfondi que pour le cas rupture du câble. Le volet 3 portera plus particulièrement sur les moyens d'éviter la perte de contrôle du déplacement de la cage, à savoir : des moyens de freinage redondants et indépendants, des systèmes de commandes à redondance élevée et éventuellement un monitoring global du système d'extraction avec pilotage informatique.

L'examen détaillé des réglementations provinciales concernant les parachutes et les câbles d'extraction a montré que de petites différences existaient d'une province à l'autre, même si globalement les exigences réglementaires sont similaires. Parmi les différences notables, on retiendra que le Québec est une des rares provinces à autoriser l'abaissement du FS à la molette comme c'est le cas en Afrique du Sud. Le RSSM n'indique pas de valeurs limites de décélération lors du test de chute libre des parachutes et le Québec est une des rares provinces dans ce cas-là. D'une manière générale, avec l'arrivée sur le marché de nouveaux dispositifs de suivi continu des câbles, un encadrement réglementaire sera vraisemblablement à prévoir dans les années à

venir afin de définir clairement à quels essais ils peuvent se substituer. Enfin, une description plus précise des exigences de l'inspection quotidienne des parachutes pourrait être un ajout intéressant.

BIBLIOGRAPHIE

- 30-CFR - Part 75, 2014, 30 CFR - PART 75-MANDATORY SAFETY STANDARDS UNDERGROUND COAL MINES (Mine Safety and Health Administration, Code of Federal Regulations), 30-CFR - Part 75, MSHA
- ABB, 2014, "Mine hoist disc brake systems - Improved safety, availability and productivity", Vol. Site web ABB
- Anderson, G. L., Ruff, T. M., and Sands, P. F., 1994, "Evaluation of nondestructive test instruments for wire rope", *US Bureau of Mines*, Rapport n° RI9511
- Anon, 12-1-1995, "Recent mine safety R&D projects of the U.S. Bureau of Mines", *Engineering and Mining Journal*, Vol. 196, n°11, p. 26-28
- Anon, 2012a, "A world first in emergency brakes", *Motion Control*, Vol. 3rd Quarter 2012, n°Hydraulic systems & components
- Anon, 2012b, "Flsmidth Production Winder Being Manufactured for Mopani (Mining World website)", *Mining World*
- Anon, 2012c, "Mine product news: Synthetic mine hoist rope passes critical coiling test", *Plant engineering and maintenance*
- Anon, 2013, "Manufacturers invest in efficient mining hoists (OCH website)", <http://www.ochmagazine.com/features/manufacturers-invest-in-efficient-mining-hoists/>, *Overhead, Crane and Hoist magazine*
- Anon, 2014, "FLSmidth plans growth in mine shaft systems", <http://www.im-mining.com/2014/01/15/flsmidth-plans-growth-in-mine-shaft-systems/>, *International Mining*
- Ansys, 2014, "ANSYS ROPE CONDITION MONITORING EQUIPMENT", <http://www.ansys.co.za/Website%20pdfs/Mining%20and%20Industrail/CRMS%20Overview.pdf>, *Ansys Website*
- AS 3785.6, 1992, Underground mining - Shaft equipment - Part 6 : Guide and rubbing ropes for conveyances, AS 3785.6-1992, Standards Australia
- AS 3785.8, 1994, Underground mining - Shaft equipment - Part 8 : Personnel conveyances in other than vertical shafts, AS 3785.8-1994, Standards Australia
- AS 3785.5, 1998, Underground mining - Shaft equipment - Part 5 : Headframes, AS 3785.5-1998, Standards Australia
- AS 3785.4, 2002, Underground mining - Shaft equipment - Part 4 : Conveyances for vertical shafts, AS 3785.4-2002, Standards Australia
- AS 3785.3, 2005, Underground mining - Shaft equipment - Part 3 : Drum winding gripper system, AS 3785.3-2005, Standards Australia
- AS 3785.1, 2006, Underground mining - Shaft equipment - Part 1 : Shaft overwind safety catch system, AS 3785.1-2006, Standards Australia
- AS 3785.2, 2006, Underground mining - Shaft equipment - Part 2 : Shaft winding arresting systems, AS 3785.2-2006, Standards Australia
- AS 3785.7, 2006, Underground mining - Shaft equipment - Part 7 : Sheaves, AS 3785.7-2006, Standards Australia
- ASTM E1571, 2011, Standard Practice for Electromagnetic Examination of Ferromagnetic Steel Wire Rope, ASTM E1571, ASTM, American Society for Testing and Materials
- Babendererde, S. et Pusch, J., 2007, "Managing and lubricating ropes with oil", *Proceedings of the OIPEEC Conference (Johannesburg)*

- Barkand, T. D., "APPLICATION OF DYNAMIC BRAKING TO MINE HOISTING SYSTEMS", *National Technical Information Service*, p. 14
- Barkand, T. D., 12-1-1990, "Elevator safety: Give the miner a brake", *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, n°pt 2, p. 1421-29
- Barkand, T. D., 1-1-1992a, "Ascending elevator accidents: Give the miner a brake", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 28, n°3, p. 720-729
- Barkand, T. D., 1992b, "EMERGENCY BRAKING SYSTEMS FOR MINE HOISTS", *National Technical Information Service*, p. 14
- Barkand, T. D., 2002, "Application of a Suspension Rope Brake to a Single Rope Mine Hoisting System", *National Technical Information Service*, p. 14
- Baumann, M., 2009, "Cognitions from the Schilthorn Incident Regarding Track Rope Maintenance", *International Organisation for Transportation by Rope - North American Continental Section*, Rapport n° DATE EXACTE ?
- Bestech, 2014, "RopeInspector - Automated Visual Rope Inspection - Full Speed Continuous Rope Monitoring System",
http://www.bestech.com/Downloads/ProductSheets/BESTECH_RopeInspector.pdf,
Bestech Website
- Beus, M. J. et McCoy, W. G., 12-1-1995, "Mine shaft conveyance load-monitoring system", *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, Vol. 3, p. 2048-53
- Beus, M. J. et Ruest, M., 12-1-2002, "New technology for hoist conveyance monitoring and analysis", *CIM Bulletin*, Vol. 95, n°1065, p. 78-83
- Beus, M. J., Ruff, T. M., et McCoy, W. G., 12-1-1997, "Conveyance monitoring to improve mine hoisting safety", *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, Vol. 3, p. 2091-97
- Bjerke, E., 1946, Safety means for mine cages, Patent n°U.S. 2,403,333
- CAN/CSA-G4, 2009, "Steel wire rope for general purpose and for mine hoisting and mine haulage"
- Canova, A., Degasperi, F., Ficili, F., Forzan, M., et Vusini, B., 2009, "Experimental and numerical characterisation of ferromagnetic ropes and non-destructive testing devices", *Proceedings of the OIPEEC Conference / 3rd International Ropedays - Stuttgart*
- Canova, A., Ficili, F., Rossi, D., Sciacca, F., et Vusini, B., 201, "Innovative Magneto-Inductive Systems for Metallic Ropes", ? Date ?
- Chaplin, C. R., 2008, "Interactive Fatigue in Wire Rope Applications", *Proceedings of the Conference on the Mechanics of Slender Structures - Baltimore*
- CSST, 1982, "Rapport d'enquête d'accident : accident avec dommages matériels importants survenu le 31 août 1982", *Rapport d'enquête*, Rapport n° EN-001334
- CSST, 1996, "Rapport d'enquête d'accident : accident mortel survenu à un travailleur le 16 mai 1996, vers 11 h 45, chez Vamcior inc., projet Audrey, Mine Bouchard-Hébert", *Rapport d'enquête*, Rapport n° EN-001334
- CSST, 2003a, "Code de pratique traitant de l'évaluation de la condition des câbles à fils métalliques sur les machines d'extraction - Norme sud-africaine SABS 0293 - Édition de 1996", CSST
- CSST, 2003b, "Code de pratique traitant des performances, des essais et de l'entretien des machines d'extraction à tambour du point de vue de la sécurité des câbles d'acier - Norme sud-africaine SABS 0294 - Première édition - 2000", CSST

- CSST, 2010, "Rapport d'enquête d'accident : accident mortel survenu à trois travailleurs le 30 octobre 2009 à l'entreprise Ressources Métanor inc. (Lac Bachelor) à Desmaraisville", *Rapport d'enquête*, Rapport n° EN-003835
- CSST, 2012, "Rapport d'enquête d'accident : bris majeur de l'installation d'extraction survenu le 13 juillet 2011 à l'entreprise lamgold Corporation, Mine Doyon, Preissac", *Rapport d'enquête*, Rapport n° EN-003908
- Delahaye, D., 2010, "Cours de Surete de Fonctionnement - Cours n9 : Arbres de Defaillances", *Conservatoire National des Arts et Métiers*
- Dietz, P., Lohrengel, A., Schwarzer, T., et Wächter, M., 2009, "Problems related to the design of multi layer drums for synthetic and hybrid ropes", *Proceedings of the OIPEEC Conference / 3rd International Ropedays - Stuttgart*
- El Barkany, A., Benali, A., El Ghorba, M., et Choukir, A., 2013, "The Inspection of Crane Wire Ropes in Moroccan Service: Discard Criteria and Monitoring Procedure", *International journal of engineering and advanced technology*, Vol. 2, n°3
- Erdonmez, C. et Imrak, C., 2011, "A finite element model for independent wire rope core with double helical geometry subjected to axial loads", *Indian Academy of Science, Sadhana*, Vol. 36, n°6, p. 995-1008
- Ericson, C. A., 2005, "Fault tree analysis", in Hazard analysis techniques for system safety, Wiley & Sons
- FLSmith, 2014, "Systèmes de puits de mine", *Site web FLSmith*
- Fortin, G. and Demers, R., 2011, "Les machines d'extraction", *Direction des communications et des relations publiques, CSST, Guide CSST*
- Gagnon, G. E., 1949, Mine cage safety device, Patent n°U.S. 2,586,217
- Galloway, L. C. et Tiley, G. L., 12-1-1986, "MINE HOIST BRAKING SYSTEMS", *CIM Bulletin*, Vol. 79, n°894, p. 50-60
- Giraud, L., Galy, B., Germain, L. et Bourbonnière, R., 2019, "Sécurité des machines d'extraction commandées par systèmes programmables électroniques", *IRSST, Fiche technique, Études et recherche*, Rapport n° RF-1049
- Giraud, L., Galy, B., Germain, L. et Bourbonnière, R., 2019, "Sécurité des machines d'extraction commandées par systèmes programmables électroniques - Annexe", *IRSST, Fiche technique, Études et recherche*, Rapport n° RA-1049
- Gorzalczynski, S., 12-1-2002, "Limitations of safety arrest mechanisms for mine shaft conveyances", *CIM Bulletin*, Vol. 95, n°1065, p. 67-71
- Greyling, P., Rontgen, R., Rebel, G., et Schmitz, B., 2007, "Premature discard of 45 mm ropes operating on a Blair Multi-Rope rock winder", *Proceedings of the OIPEEC Conference (Johannesburg)*
- Groves, W. A., Kecojevic, V. J., et Komljenovic, D., 2007, "Analysis of fatalities and injuries involving mining equipment", *Journal of Safety Research*, Vol. 38, n°4, p. 461-70
- Harrington, D. and East, J. H., 1948, "Safety catches on mine cages and methods of testing them", *U.S. Bureau of Mines*, Rapport n° I.C. 7436
- Haase, D., Wacker, E.-S., Schukat-Talamazzini, E.G., et Denzler, J., 2010, "Analysis of Structural Dependencies for the Automatic Visual Inspection of Wire Ropes", *Proceedings of the 15th International Workshop on Vision, Modelling, and Visualization*
- Hecker, G. F. K., 1996, "The safe use of mine winding ropes - Volume 1: executive summary", *Safety in mines research advisory committee (SIMRAC)*, Rapport n° GAP054
- HSE, 2000, "Wire Rope Non-Destructive Testing - Survey of Instrument Manufacturers", *Health & Safety Executive*, Rapport n° OTO 2000 064

- HSE, 2004, "Guidance on the selection, installation, maintenance and use of steel wire ropes in vertical mine shafts", *Her Majesty's Stationery Office - Health and Safety Commission. Deep mined Coal Industry Advisory Committee*
- Hunter, C., 2013, "Synthetic Rope for Mine Hoisting", *Natural resources Canada website*
- IEC 1025:1990, 1990, Analyse par arbre de panne, IEC 1025, IEC, International Electrotechnical Commission
- IEC 61508:2002, 2002, Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité, IEC 61508, IEC, International Electrotechnical Commission
- ISO 13850, 2006, Safety of machinery - Emergency stop - Principles for design, ISO 13850:2006, International Organisation for Standardization
- ISO 13849, 2006, Sécurité des machines -- Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité -- Partie 1 : Principes généraux de conception, ISO 13849:2006, International Organisation for Standardization
- ISO 4309, 2010, Appareils de levage à charge suspendue - Câbles - Entretien et maintenance, inspection et dépose - Quatrième édition, ISO 4309 : 2010, International Organisation for Standardization
- Keckojevic, V., Komljenovic, D., Groves, W., et Radomsky, M., 2007, "An analysis of equipment-related fatal accidents in U.S. mining operations: 1995–2005", *Safety Science*, Vol. 45, n°8, p. 864-74
- Klees, D. A., Hoganson, R. B., and Data, H. L., 1989, Rope with fiber core and method of forming same, Patent n°US 4887422 A
- Klein, T. W., 2010, "Advancements in the Field of Wire Rope Design and Manufacturing", *Wirecostructures*
- Kleynhansm J., Kapp, J., Rebel, G., et Schmitz, B., 2007, "A case study of 54mm ropes operating on a double drum rock winder", *Proceedings of the OIPEEC Conference (Johannesburg)*
- Koepe, F., 1878, Improvement in elevators, Patent n°US 206,251
- Kopanakis, G. A., 201, "The Importance of the Visual Inspection for Ropeway Ropes", *International Organization for Transportation by Rope - North American Continental Section*, Rapport n° DATE ?
- Kotzé, L., 2010, "Driefontein gold mine Pitseng - BMR incident", *GoldFields*
- Kovalchik, P. G. et Duda, F. T., 12-1-1995, "Speed and position sensors for mine hoists and elevators", *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, Vol. 3, p. 2054-56
- Kumar, A. et Hem, P., 2012, "Technomine - Hoists (Infomine website)", <http://technology.infomine.com/reviews/Hoists/welcome.asp?view=full>, *Infomine*
- Larsen, C. H., Egen, R. A., et Cress, H. A., 9-27-1972, "Investigation of Requirements and Performance of Safety Catches on Wire-Rope-Suspended, Man-Carrying Conveyances in United States Coal Mines", *National Technical Information Service*, p. 174
- Leonida, C., 2013, "Taking the strain", *Mining Magazine*, Vol. 20 Fev 2013
- Lunderstedt, D., Boutin, E., et Du Preez, A., 2012, "Mine Conveyance Safety Fall Arrest System for #1 Shaft, Rio Tinto Oyu Tolgoi Mine, Mongolia", *Mine Expo, Las Vegas, Nevada, Sept 25, 2012*
- MacNeill, P., 2008, "International Mining Fatality Database - Project Report", *NSW Department of Primary Industries*
- Maiti, J., Khanzode, V. V., et Ray, P. K., 2009, "Severity analysis of Indian coal mine accidents – A retrospective study for 100 years", *Safety Science*, Vol. 47, n°7, p. 1033-42

- Malston, V. H., 1909, Safety catches for mine skips and cages, and the like, Patent n°U.S. 917,332
- McIvor, R. A., 12-1-1996, "Mine shaft conveyance safety mechanism - free-fall testing", *CIM Bulletin*, Vol. 89, n°1004, p. 47-50
- McLaughlin, B., 2004a, "Is the double drum hoist still viable at depth? Recent experiences", *CIM Bulletin*, Vol. 97, n°1083
- McLaughlin, B., 6-22-2004b, "Deep shaft hoisting at LaRonde - The Penna shaft hoisting plant", *CIM Bulletin*, Vol. 97, n°1080, p. 44-50
- McLaughlin, Bennett, 2013, Thoughts on the Horne system (Mine Expo, Las Vegas, Septembre 26, 2012)
- MegLab, 2013, "Continuous Monitoring Wire Ropes for Mine Hoisting Operations", *23rd World Mining Congress*
- Miscoe, A. J. and McKewan, W. M., 1993, "Wire rope research : Analysis of bending fatigue in a 2-inch IWRC wire rope", *United States Department of the Interior - Bureau of Mines*, Rapport n° RI9466
- Morrisson, L., 2009, "SA technology changing the face of Canadian mine safety", *Mining Weekly*, Vol. February 2009
- Morrisson, L., 2013, "Simulated mine shaft rig for full-load testing", *Mining Weekly*, Vol. April 2013
- Mortureux, Y., 2002, "Arbres de défaillance, des causes et d'événement", *Techniques de l'ingénieur, Sécurité et gestion des risques*
- Mouys, J.-C., 1984, "Histoire d'Anzin", *Réédition de 1997*
- Otis, E., 1861, Improvement in hoisting apparatus, Patent n°US 31128 A
- Paques, J.-J. and Germain, L., 2005, "Sécurité des machines d'extraction commandées par systèmes programmables", *IRSST, Fiche technique, Études et recherche*, Rapport n° RF-412
- Pearce, C. M. and Cash, F. E., 1945, "Testing safety catches on mine cages - Lake superior district", *U.S. Bureau of Mines*, Rapport n° I.C. 7325
- Platzer, E. S., Nägele, J., Wehking, K.-H., et Denzler, J., 2009, "HMM-based Defect Localization in Wire Ropes - A new Approach to Unusual Subsequence Recognition", *Computer Science -*, Vol. 5478, n°Pattern Recognition, Lecture Notes, p. 442-51
- Queensland, 2013, "Metalliferous underground safety statistics (1 Juillet 2007 - 30 Juin 2012)", *Queensland Government - Department of natural resources and mines*
- R-AB, 2003, Occupational Health and Safety Act - Mines safety regulation, Alberta Regulation 292/95, Alberta
- R-BC, 2008, Health, Safety and Reclamation Code for Mines in British Columbia, RSBC, Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources Mining and Minerals Division
- R-Ca, 2014, Mine Safety Orders, Department of Industrial Relations, Division 1. Department of Industrial Relations, Chapter 4. Division of Industrial Safety, Subchapter 17. Mine Safety Orders, R-Ca
- R-MB, 2011, The workplace safety and health act (C.C.S.M. c. W210) - Operation of Mines Regulation, Regulation 212/2011, Manitoba
- R-NB, 2011, Occupational Health and Safety Act (O.C. 96-968) - Underground Mine Regulation, Reg 96-105, New-Brunswick
- R-NL, 2010, Newfoundland and Labrador - REGULATION /10 (draft), REGULATION /10, Newfoundland and Labrador
- R-NL, 2012, Occupational Health and Safety Regulations NLR 5/12, NLR 5/12, Newfoundland and Labrador

- R-NS, 2008, Underground Mining Regulations made under Section 82 of the Occupational Health and Safety Act, S.N.S. 1996, c. 7, O.I.C, Nova Scotia
- R-NSW, 2011a, Guidelines - Mine winders - Part 3 : Vertical shaft winders, MDG 33.3, R-NSW
- R-NSW, 2011b, Guidelines - Mine winders - Part 6 : Control Systems, MDG 33.6, R-NSW
- R-NSW, 2011c, Guidelines - Mine winders - Part 7 : examination, testing and retirement of ropes, MDG 33.7, R-NSW
- R-NT, 2003, Mine Health and Safety Regulations, NWT Reg 125-95, Northwest Territories
- R-NT, 2004, Mine Health and Safety Regulations, NWT Reg 125-95, Northwest Territories
- R-NU, 2014, Mine Health and Safety Regulations, NU Reg 125-95, Nunavut
- R-ON, 2013, Occupational Health and Safety Act, Mines and mining plants, R.R.O. 1990, REGULATION 854, Ontario
- R-QC, 2014, Règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines, S-2.1, r. 14, Éditeur officiel du Québec
- R-SK, 2003, The Mines Regulations, Chapter O-1.1 Reg 2, Saskatchewan
- R-USA, 2014, Federal Mine Safety & Health Act of 1977, Public Law 91-173, as amended by Public Law 95-164*, 91-173, R-USA
- R-WA, 2013, Mines Safety and Inspection Regulations 1995, Version 05-e0-03, R-WA
- R-YT, 2002, Occupational Health and Safety Act, S.Y. 1989-90, c.8, s.2 ; R.S., c.123, s.2., Government of the Yukon
- Rebel, G., Verreet, R., et Schmitz, B., 2011, "Degradation mechanisms of wire ropes operating on multi-layer crane and mine hoisting drums", *Proceedings of the OIPEEC Conference*
- Regan, R., 2002, "Safety Alert - Winder balancer rope failure", *NSW Trade & Investment - Mine safety operations branch*
- Ridge, I. M. L., O'Hear, N. O., Verreet, R., Grabandt, O., et Das, C. A., 2007, "High strength fibre cored steel wire rope for deep hoisting applications", *Proceedings of the OIPEEC Conference (Johannesburg)*
- Scheunemann, W., Vogel, W., et Barthel, T., 2009, "Steel Wire Ropes for Traction Elevators: Part Two", *Elevator World*, Vol. July 2009
- Slesarev, D. et Vorontsov, A., 2012, "Automated Assessment of Steel Wire Ropes Residual Life Time Based on Magnetic NDT Data", *Proceedings of the 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa*
- Sloman, H. J., 1944, "Testing safety catches on mine cages at some eastern bituminous coal mines", *U.S. Bureau of Mines*, Rapport n° I.C. 7290
- Smith, R. L. et Verreet, R., 2005, "Hoist Ropes for Double-Drum Winders — A New Concept", *Proceedings of the Hoist and Haul Conference*
- Smith, T. et Koppe, W., 2008, "A case study of two NSW DPI incident investigations and the results from testing conducted on a winder haulage rope and chain components", *NSW Minerals Industry - OHS Conference 2008*
- Sparg, E. N., 1995, "DEVELOPMENTS IN HOIST DESIGN TECHNOLOGY APPLIED TO A 4000 METRE DEEP SHAFT", *Mining Technology*, Vol. 77, n°886, p. 179-84
- Strickling, K. G., 2008, "Program Information Bulletin N° P08-19 - Re-Issue of P01-4 - Hoist Examination and Safety Test Requirements", *Coal Mine Safety and Health*
- Tiley, P., 2011, "Mining engineering handbook - Chap 12.9 : Hoisting systems", in *Mining engineering handbook*, SME
- Tollinsky, N., 2007, "Wabi Iron & Steel celebrates 100 years", *Sudbury Mining Solutions Journal*, Vol. September 2007
- Tollinsky, N., 2012, "Synthetic rope passes coilability test", *Sudbury Mining Solutions Journal*

- Tower, W. O., Smith, R. L., Bawden, W. E., Cooper, D. F., Taylor, J. B., Walkom, E. S., Little, E. S., Weir, E. B., Douglass, D. P., and Ward, J. L., 1946, "Report on the mining accidents in Ontario in 1945", *Province of Ontario, Department of mines*, Rapport n° Bulletin N°137
- TRG Part 4, 2020, Technical reference guide - Powered winding systems - Part 4: Ropes, NSW Resources Regulator
- TRG Part 5, 2020, "Technical reference guide: Powered winding systems – Part 5: Winding control systems, NSW Resources Regulator
- Udd, J., 2004, "International Review of the Use and Testing of Wire Ropes in Mine Hoisting", *CIM Bulletin*, Vol. 97, n°1083
- Van Rensburg, J., Rontgen, R., Rebel, G., et Schmitz, B., 2009, "Update concerning the premature discard of 45 mm ropes operating on a Blair multi-rope rock winder", *Proceedings of the OIPEEC Conference / 3rd International Ropedays - Stuttgart*
- Van Zyl, M., 2002, "Technology transfer of winder ropes research - Final Report", Rapport n° GAP637
- Vaydo, G., 1950, Safety dog for elevators and mine cages, Patent n°U.S. 2,583,907
- Verreet, R., 1998, "Calculating the service life of running steel wire rope", Rapport n° 8/98
- Verreet, R., 2011, "What we can learn from wire rope failures: Predictable and unpredictable rope failures", *OIPEEC Conference*
- Vincoli, J. W., 2006, "Fault tree analysis", in Basic Guide to System Safety, Wiley & Sons
- Vorontsov, A., Volokhovskiy, V., Halonen, J., et Sunio, J., 2007, "Prediction of operating time of steel wire ropes using magnetic NDT data", *Proceedings of the OIPEEC Conference (Johannesburg)*
- Walker, W. D. and Stahl, R. W., 1961, "Recommended procedures for mine hoist and shaft installation, inspection, and maintenance", *U.S. Bureau of Mines*, Rapport n° I.C. 8031
- Weischedel, H. R., 200b, "Crane Wire Rope Damage and Nondestructive Inspection Methods", *NDT Technologies, Inc.*, Rapport n° DATE EXACTE ?
- Weischedel, H. R., 200a, "Crane Wire Rope Damage and Nondestructive Inspection Methods", *NDT Technologies, Inc.*, Rapport n° DATE EXACTE ?
- Winspect, 2014, "Why visual rope inspection?", <http://www.winspect.info/en/why-visual-rope-inspection>, *Winspect website*
- XCMSE, 2014, "BF-Type Safety Catches", *Xuzhou Coal Mine Safety Equipment Manufacture Co.*, <http://www.meian.com.cn/?p=12&a=view&c=17&r=29%20>, *XCMSE Website*
- Young, C. R., 1947, "Investigations regarding the safety of hoisting equipment and hoisting practice in Ontario mines", *Province of Ontario, Department of mines*, Rapport n° Bulletin n°138

ANNEXE I : DÉFINITIONS

Quelques définitions générales sont données dans cette section afin d'aider le lecteur à la compréhension du texte. Un glossaire est donné en annexe IV afin d'établir des parallèles entre les différentes appellations d'un même objet ou élément, qui peuvent varier d'un pays à l'autre.

Accident : tout évènement non désiré ayant pour conséquence des blessures ou des décès parmi les travailleurs (avec potentiellement des dégâts matériels).

Arrêt d'urgence : la définition choisie est celle de la norme ISO 13850 (ISO 13850, 2006). La fonction d'arrêt d'urgence est destinée à :

- parer à des phénomènes dangereux en train d'apparaître ou atténuer des phénomènes dangereux existants pouvant porter atteinte à des personnes, à la machine ou au travail en cours ;
- être déclenchée par une action humaine unique.

Câble traînant : câble coupé entre la molette et le tambour, mais continuant de maintenir une tension suffisante au niveau de la cage pour empêcher le déclenchement des parachutes. Ce cas de figure survient lorsque la friction est importante entre le câble et le tambour, ou encore lorsque le câble s'empêtre autour de l'arbre de transmission. En anglais le terme *trailing rope* est utilisé.

Cage : dispositif servant à transporter dans un puits de mine des personnes uniquement au moyen d'une machine d'extraction.

Cage-skip : dispositif servant à transporter dans un puits de mine des personnes et des matériaux au moyen d'une machine d'extraction.

Cuffat : dispositif servant à transporter dans un puits de mine des personnes ou des matériaux au moyen lors des opérations de fonçage. En anglais : *kibble* ou *bucket*.

Essais de débattement limité : essai visant à s'assurer du mouvement libre des pièces constituant le parachute jusqu'à application des mâchoires sur les guides en bois.

Essai de débattement total : essai visant à s'assurer du mouvement libre des pièces constituant le parachute jusqu'à déploiement complet des mâchoires (une encoche est préalablement creusée dans les guides en bois à l'endroit approprié).

Essai de dégagement rapide : nous reprenons la définition du RSSM « tout essai consistant à lâcher la cage, le skip ou l'ensemble cage-skip d'une position stationnaire pour que les mâchoires du parachute puissent mordre le guidage ». En anglais les termes varient : *drop test*, *quick release test*. La caractéristique de cet essai est que la vitesse initiale de la cage est nulle.

Essai de chute libre : le RSSM donne la définition suivante : « tout essai consistant à lâcher la cage, le skip ou l'ensemble cage-skip sous la charge maximale admise pour le transport de personnes, afin que les mâchoires du parachute puissent mordre le guidage lorsque la cage, le skip ou l'ensemble cage-skip descend à la vitesse maximale d'extraction ». Nous la généraliserons en considérant un essai de chute libre lorsque la vitesse initiale de la cage (lors de l'engagement des mâchoires dans les guides) est différente de 0. En effet, suivant les provinces cet essai se fait, à vitesse normale d'extraction, ou à une vitesse équivalente à 1,5 m de chute libre (5,42 m/s). En anglais, ce test est appelé *free-fall test*.

Facteur de sécurité : nous reprenons la définition du RSSM « le rapport entre la charge de rupture et la charge d'utilisation ».

Incident : tout évènement non désiré ayant pour conséquence des dégâts matériels (sans blessure ou décès parmi les travailleurs).

Mâchoire : partie du parachute enserrant le guide en bois lors du déclenchement du système et enfonçant les dents (*dog teeth*) dans le guide.

Molette : nous reprenons la définition du RSSM « la roue à gorge, située entre la machine d'extraction et le transporteur, qui porte le câble d'extraction et le dévie dans l'axe longitudinal du puits ». En anglais *headsheave* ou *sheave* ;

Parachute : système fixé sur la cage, permettant d'arrêter sa chute dans l'éventualité d'une rupture du câble (ou d'un mou de câble). En anglais ce système est appelé : *safety catches*, *safety dogs*, *safety device*, ou même *gripper system* en Australie.

Pas de câble : distance, mesurée de façon axiale le long du câble, entre la couronne (plus haut point) d'un toron et la prochaine couronne du même toron. En anglais *lay length*.

Skip : dispositif servant à transporter dans un puits de mine des matériaux uniquement au moyen d'une machine d'extraction.

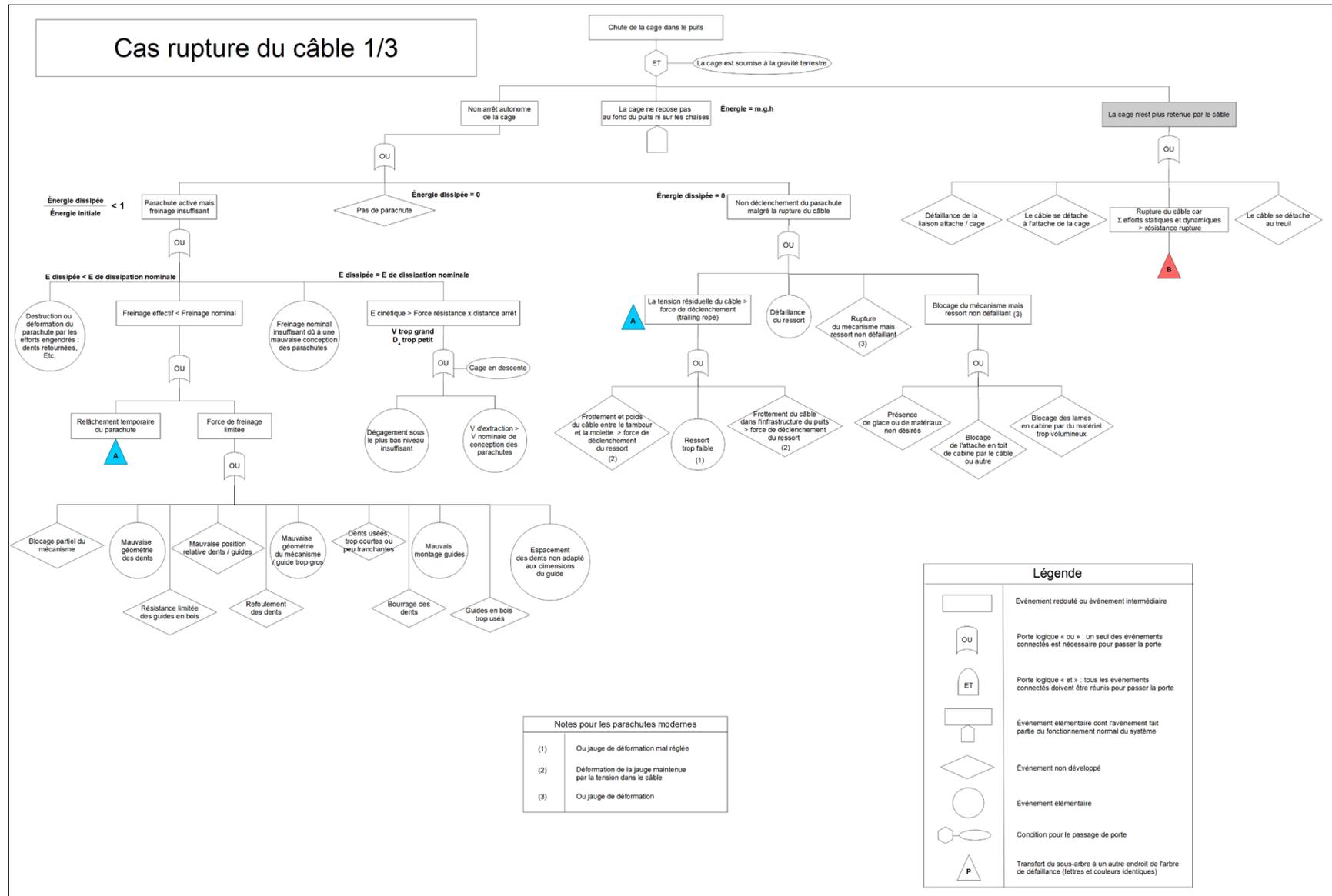
Transporteur : nous reprenons la définition du RSSM « tout dispositif servant à transporter dans un puits de mine des personnes ou des matériaux au moyen d'une machine d'extraction tels une cage, un skip, un cuffat et un ensemble cage-skip ».

Treuil à tambour : terme générique couvrant les treuils à tambour, à tambour double, en anglais *drum hoist*, ou *drum winder en Australie*. Type de treuil le plus courant en Amérique du Nord : un seul câble par cabine.

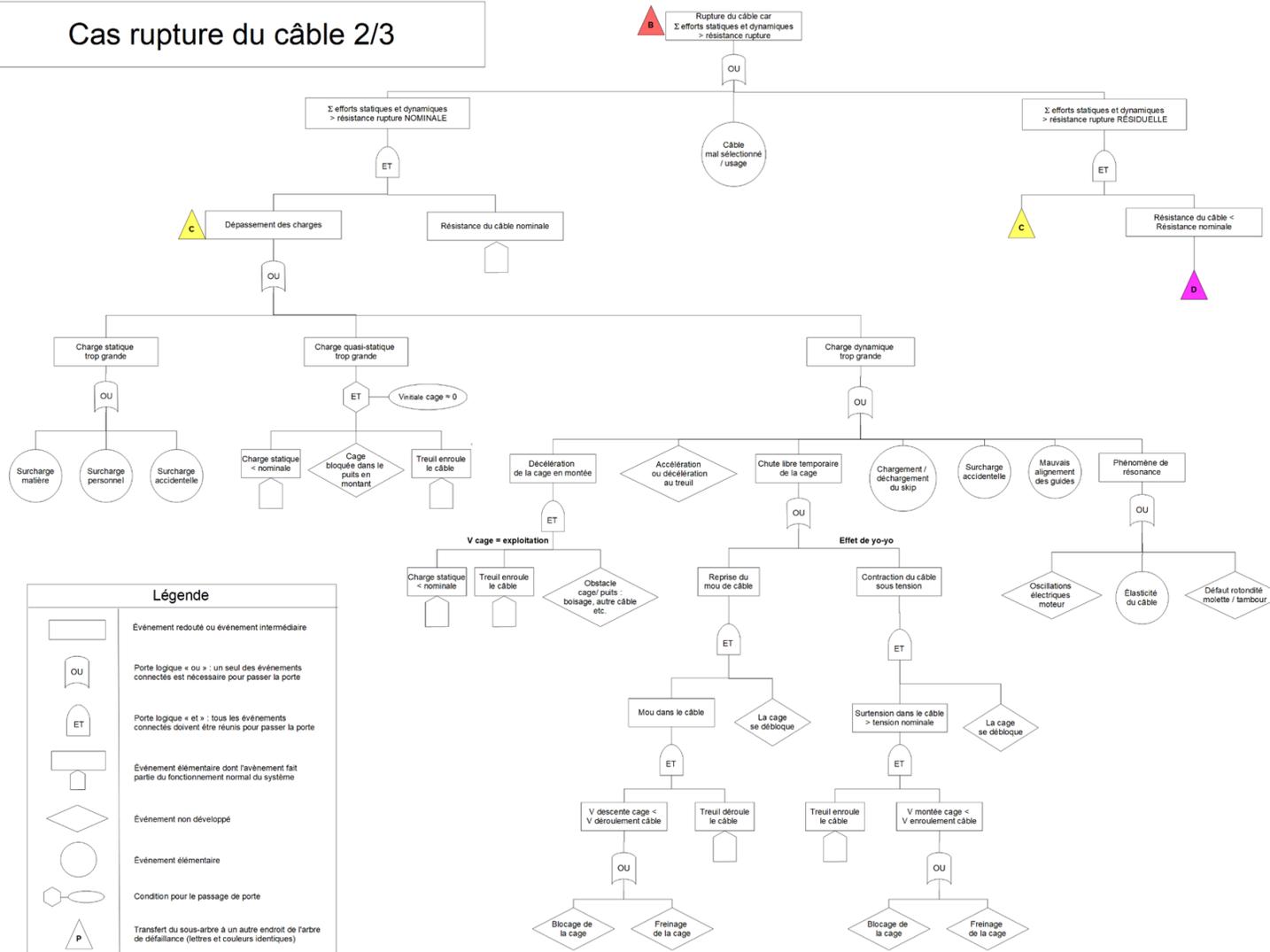
Treuil à friction : également appelé treuil Koepe (du nom de son inventeur Carl Friedrich Koepe) (Koepe, 1878 ; Kumar et Hem, 2012 ; Tiley, 2011), ou machine d'extraction à poulie d'adhérence multicâble. En anglais *friction hoist*, ou *Koepe Hoist*. Ce type de treuil comprend plusieurs câbles : câble de frottement, câble d'équilibre. Ce type de treuil est minoritaire en Amérique de Nord. Il peut y avoir un ou plusieurs câbles par cabine. C'est le système le plus proche des ascenseurs commerciaux. En général, les câbles ne sont pas sollicités au-delà de 12 % de leur limite de rupture pour éviter une fatigue trop importante, ce qui limite les profondeurs d'utilisation autour de 1 800-2 000 m (Anon, 2013).

Treuil Blair : le treuil Blair a été inventé par Robert Blair en 1957 (Anon, 2012b ; Anon, 2013 ; FLSmith, 2014). Les treuils Blair (en anglais *Blair Multi-Rope hoist* ou BMR) sont caractérisés par des tambours séparés pour chaque câble et plusieurs câbles soutenant le même skip. Un système de compensation est utilisé afin de répartir adéquatement le poids sur les deux câbles. Ce type de treuil permet de soulever de lourdes charges à très grande profondeur : 23 tonnes à 3 150 m pour Vaal River (FLSmith, 2014). Ce type de treuil est surtout utilisé en Afrique du Sud, et environ 50 treuils de ce type sont en service dans le monde, dont 90 % environ ont été installés par FLSmith (Anon, 2013 ; Anon, 2014).

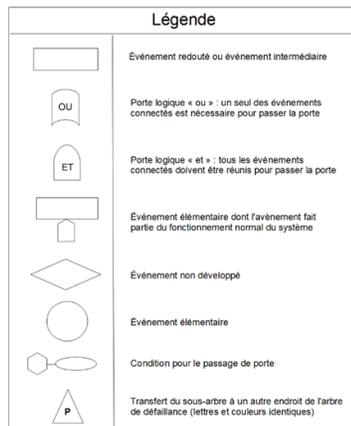
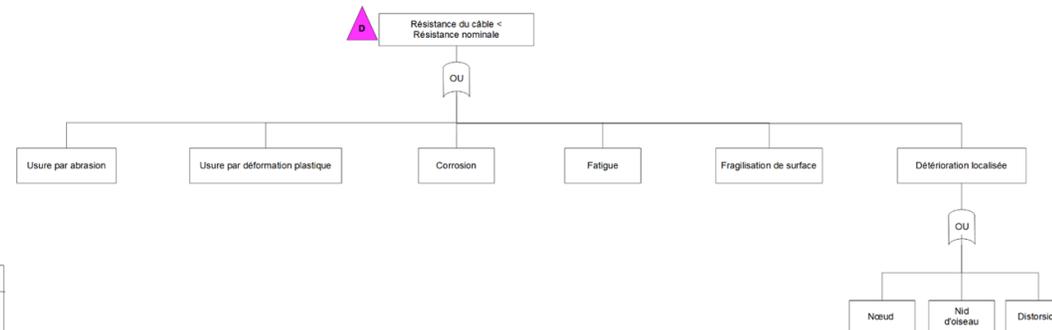
**ANNEXE II :
ARBRES DE DÉFAILLANCE**

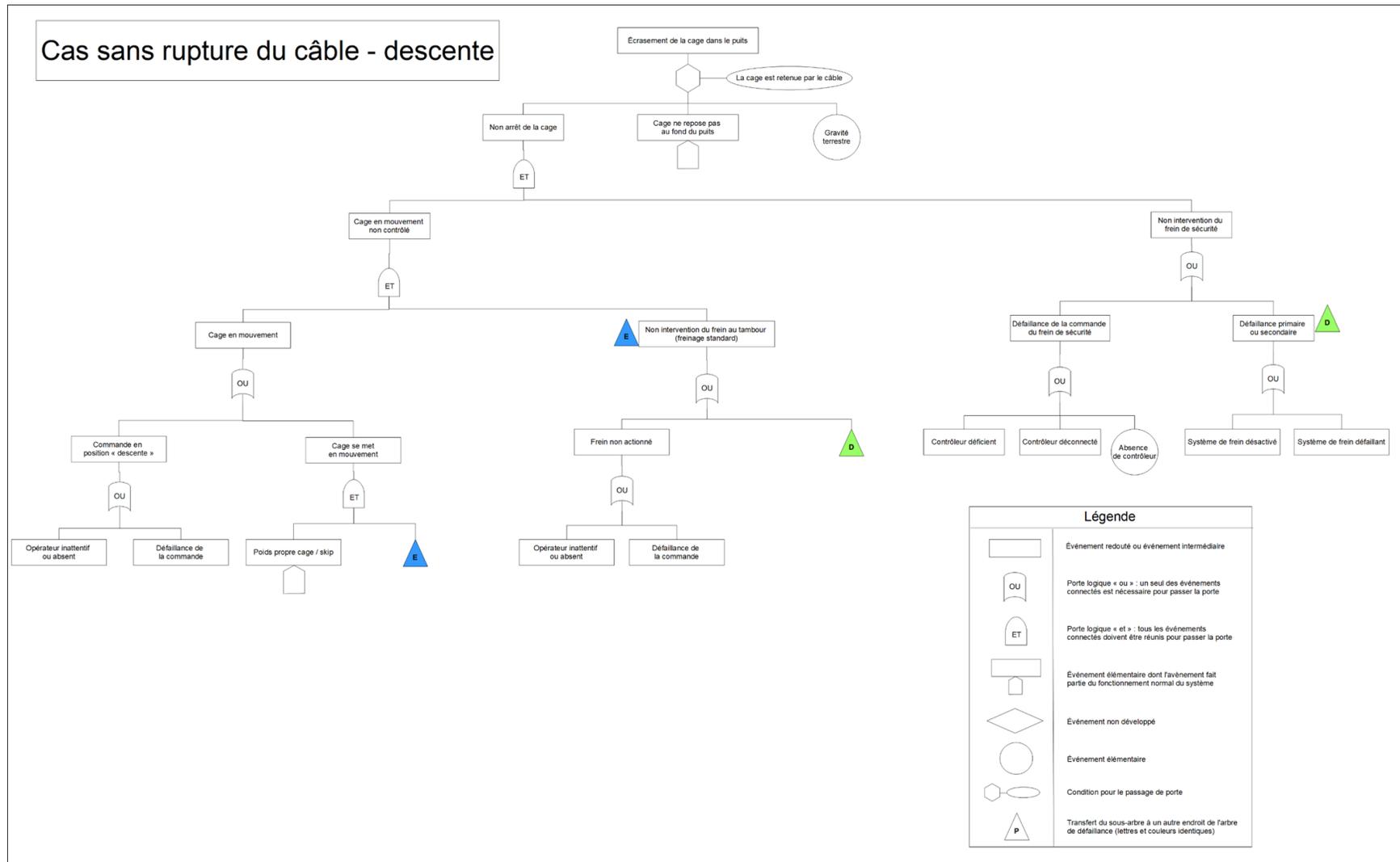


Cas rupture du câble 2/3

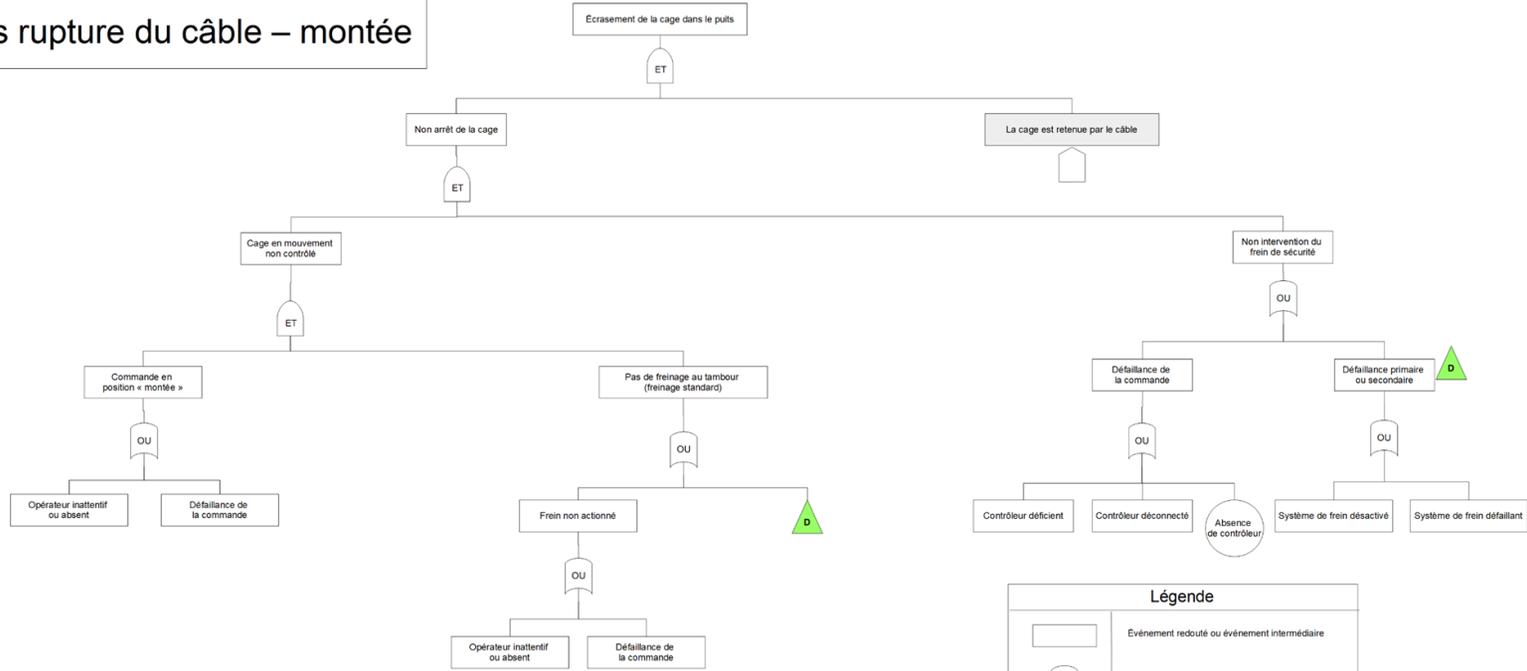


Cas rupture du câble 3/3





Cas sans rupture du câble – montée



Légende	
	Événement redouté ou événement intermédiaire
	Porte logique « ou » : un seul des événements connectés est nécessaire pour passer la porte
	Porte logique « et » : tous les événements connectés doivent être réunis pour passer la porte
	Événement élémentaire dont l'avènement fait partie du fonctionnement normal du système
	Événement non développé
	Événement élémentaire
	Condition pour le passage de porte
	Transfert du sous-arbre à un autre endroit de l'arbre de défaillance (lettres et couleurs identiques)

ANNEXE III : TABLEAUX DE COMPARAISON DES LÉGISLATIONS PROVINCIALES

Cette section présente, sous forme de tableaux, une comparaison des législations provinciales concernant les parachutes et les câbles d’extraction.

Tableau 5. Règlements provinciaux sur les parachutes et leur inspection

Province	Parachute			Inspection	
	Art	Obligatoire	Conditions	Art.	Tous les jours
(R-QC, 2014)	323	Oui	ne s'applique pas si plusieurs câbles	327	X
(R-ON, 2013)	232(3)	Oui	1 seul câble (6) bonne pratique d'ingénierie	248(2)	X
(R-AB, 2003)	-	-	-	-	-
(R-SK, 2003)	140	Oui	1 seul câble	140(5)	X
(R-YT, 2002)	16.28	Oui	1 seul câble	16.35	X
(R-NT, 2003)	11.51	Oui	1 seul câble 11.54 validé par le « <i>chief inspector</i> »	11.116(2)(b)	X
(R-BC, 2008)	7.5.5	Oui	1 seul câble Validé par ing.	7.9.9	X
(R-NB, 2011)	217	Oui	1 seul câble 219 « adequate type and design »	256(3)	X
(R-NS, 2008)	356(2)	Oui (skip)	Validé par un ingénieur Essai de chute libre obligatoire sur cage avec un seul câble (359)	344(2)	
(R-MB, 2011)	23.1	Oui	1 seul câble Validé par un ingénieur	23.4	X
(R-NU, 2014)	11.51	Oui	1 seul câble 11.54 validé par le « <i>chief inspector</i> »	11.116(2)(b)	X
(R-NL, 2012)	612	?	Mentionné dans le règlement sans plus de précision	612	X
(R-NL, 2010) "Draft"	74	Oui	1 seul câble + validé selon art 76		

Tableau 6. Règlements provinciaux concernant les essais sur les parachutes

Province	Essai chute libre						Essai dégagement rapide			
	Art.	Date	Charge	Vitesse	Décél	Commentaire	Art.	Fréq	Charge	Commentaire
(R-QC, 2014)	326	Installation ou modification	Max	Vmax	-	Données notées et conservées sur site	328	1/3mois	?	Rapport
(R-ON, 2013)	232(6) (7) et (8)	Installation ou modification	Max	Vnorm ou 1.5m chute libre	0,9 à 2 g	Rapport	248(3)	1/3mois	Vide	Rapport
(R-AB, 2003)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(R-SK, 2003)	140(3)	Install	Max	V = 0	-	-	140(5)	1/3mois	?	Rapport
(R-YT, 2002)	16.28	Installation ou modification	Max	Vnorm	1 à 3 g	-	1628	1/6mois	Vide	-
(R-NT, 2003)	11.54 11.55	Installation ou modification	Max	Vnorm	1 à 3 g	Rapport + envoyer au « <i>chief inspector</i> »	11.11 6 (11)	1/3mois	Vide	Rapport + envoyer au chief inspector
(R-BC, 2008)	7.5.10 à 7.5.12	Installation ou modification	Max	Vnorm	1 à 3 g	-	7.9.14	1/mois 1/an	Vide Max	-
(R-NB, 2011)	220	Installation ou modification	Max	Vnorm	1 à 3 g	Prévenir comité avant test	257	1/3mois	Vide	-
(R-NS, 2008)	359	Installation ou modification	Max	Vnorm ou 1.5m chute libre	0,9 à 2 g	Obligatoire si un seul câble	344(5)	1/3mois	?	Vérifier que le « système fonctionne adéquatement », rapport
(R-MB, 2011)	23.3 (1) à (6)	Installation ou modification	Max	Vnorm ou 1.5m chute libre	1 à 3 g	Rapport inspecteur	23.4	1/3mois	?	Rapport
(R-NU, 2014)	11.54 11.55	Installation ou modification	Max	Vnorm	1 à 3 g	Rapport + envoyer au « <i>chief inspector</i> »	11.11 6 (11)	1/3mois	Vide	Rapport + envoyer au « <i>chief inspector</i> »
(R-NL, 2012)	-	-	-	-	-	-	612	1/3mois	?	Record book
(R-NL, 2010) "Draft"	76	Installation ou modification	Max	Vnorm	1 à 3 g	Installation = 2 tests (écart max 15 %) ou 3 tests (si écart entre 2 premiers > 15 %) modification = 1 test				

Tableau 7. Règlements provinciaux (et Western Australia) sur l’inspection et l’entretien des câbles

Province	Inspection	Entretien
QC (R-QC, 2014)	288.1 (renvoie à des normes d’Afrique du Sud) 305 1x/jour visuel 1x/semaine lubrification correcte 1x/mois inspection précise	288.1 (renvoie à des normes d’Afrique du Sud) 306 lubrification 1x/mois
ON (R-ON, 2013)	248(2) chaque jour visuel + 1x/mois précise	248(4) nettoyage + lubrification mini 1x/mois
AB (R-AB, 2003)	-	-
SK (R-SK, 2003)	62 1x/jour : visuel rapide 163/164 1x/mois : inspection précise	156 Lubrification aussi souvent que nécessaire
YT (R-YT, 2002)	16.35 chaque jour + 1x/sem. + 1x/mois...	16.36 nettoyage si nécessaire + lubrification mini 1x/mois
NT (R-NT, 2003)	11.116(2) chaque jour visuel 11.116(4) 1x/mois précise	11.116(9) Lubrification aussi souvent que nécessaire +1/mois mini
BC (R-BC, 2008)	7.9.9 chaque jour : visuel 7.9.11 1x/mois précise 7.9.12 1x/6mois points d’attache	7.9.15 nettoyage + lubrification mini 1x/mois
NB (R-NB, 2011)	256(3) inspection visuelle journalière 1/mois précise	258(1) nettoyage et graissage quand nécessaire
NS (R-NS, 2008)	344(2) inspection visuelle journalière 344(4) 1x/mois précise	345 nettoyage + lubrification mini 1x/mois
MB (R-MB, 2011)	25.6(2) inspection visuelle journalière 1x/mois précise (90m/min) <u>ou</u> 1x/sem. (165m/min)	24.6 : Lubrification aussi souvent que nécessaire
NU (R-NU, 2014)	11.116(2) chaque jour visuel 11.116(4) 1x/mois précise	11.116(9) Lubrification aussi souvent que nécessaire +1x/mois mini
NL (R-NL, 2012)	626 Propriétaire prépare un document avec les inspections/maintenance et envoie pour validation au ministère	626 Propriétaire prépare un document avec les inspections/maintenance et envoie pour validation au ministère
Western Aus	11.49 Inspection quotidienne $v_{max} = 1m/s$	11.46 Nettoyé et lubrifié pour minimiser l’usure et la corrosion 11.63 lubrifié mini 1x/mois

Tableau 8. Règlements provinciaux (et autres) sur les facteurs de sécurité des câbles d'extraction (treuils à tambour)

Province	Art	Au contrepoids/cage	À la molette	<u>OU</u>	Conditions
QC	art 288	8,5 pour transporteur (7,5 pour skip si pesé)	5,0	> 25 000/(4 000+L)	SABS0294:2000 SABS0293:1996 + dispositif suivi continu état du câble
ON	228(12) à (17)	8,5 pour transporteur (7,5 pour skip si pesé)	5,0	> 25 000/(4 000+L)	SABS0294:2000 SABS0293:1996
AB	-	-	-	-	-
SK	160	8,5	6,5 pour travailleurs si pas de parachutes, 5,25 sinon	-	-
YT	-	-	-	-	-
NT	11.38	8,5	5,0	-	-
BC	7.4.10 7.4.11	8,5 pour transporteur (7,5 pour skip si pesé)	5,0	-	-
NB	209	8,5 pour transporteur (7,5 pour skip si pesé)	5,0	-	-
NS	339	8,5 pour transporteur (7,5 pour skip)	5,0	-	-
MB	24.5	8,5	6,5 pour travailleurs si pas de parachutes, 5,0 sinon	<5	SABS0294:2000 SABS0293:1996
NU	11.38	8,5	5,0	-	-
NL	-	-	-	-	-
USA (R-USA, 2014)	57.19-21	?	L < 914 m (3 000') : 7,0-0,0033*L (m) 4,0 si L > 914 m (3000')	-	-
CA (R-Ca, 2014)	§7135. (19- 21)	?	L < 500' 8,0 500' < L < 1 000' 7,0 1000' < L < 2 000' 6,0 L > 2 000' 5,0	-	-
Western Aus	11.61 11.71 (friction)	?	Personnes : 7,5 — 0,001L Mat : 5,5 — 0,0003L Mat : 4,5 (puits que mat) Machine : 5, vmax < 2 m/s Friction : voir 11.71	-	-
NSW	2.9.2	?	Personnes : 7,5 — 0,001L ET > 6,0 Mat : 5,5 — 0,0003 L Mat : 4,5 (puits que mat) Fonçage > 6	-	-

Tableau 9. Règlements provinciaux (et Western Australia) sur les essais de câbles d'extraction (treuils à tambour)

Province	Essai de rupture			Essai électromagnétique		
	Art	Freq 1er	Freq suivants	Art	Freq 1er	Freq suivants
(R-QC, 2014)	295	12 mois	1x/6 mois (1x/3 mois si perte résistance 6 %)	295 (friction)	6 mois	1x/6 mois (1x/3 mois si section diminue de 6 %)
(R-ON, 2013)	228(2)	6 mois	1x/6 mois	228(4)	6 mois	1x/4 mois (ou moins si réduction de la résistance de 10 % projetée)
		Résultats => <i>safety committee or health and safety representative</i>				
(R-AB, 2003)	-	-	-	-	-	-
(R-SK, 2003)	165	6 mois	1x/6mois (ou moins si affaibli)	165	6 mois	1x/6mois (ou moins si affaibli)
		Résultats => « <i>chief inspector</i> »				
(R-YT, 2002)	16.26	18 mois	1x/6 mois	16.26	6 mois	1x/6 mois puis 1x/4 mois après 2 ans
		Résultats => directeur			Résultats => directeur	
(R-NT, 2003)	11.33	6 mois	1x/6 mois	11.34	6 mois	1x/4 mois (ou moins si réduction de la résistance de 10 % projetée)
		Résultats => « <i>chief inspector</i> »			Résultats => <i>chief inspector</i>	
(R-BC, 2008)	7.4.5	6 mois	1x/6 mois	7.4.6	6 mois	1x/6 mois puis 1x/4 mois après 2 ans (< 6mois si réduction de la résistance de 10 % projetée)
		Rapport envoyé à l'inspecteur			Résultats => inspecteur	
(R-NB, 2011)	205	18 mois	1x/6 mois	206	6 mois	1x/6 mois + prévenir un « <i>officer</i> » si perte de section de 7,5 %
(R-NS, 2008)	410(2)	1 mois	1x/mois	410(3)	4 mois	1x/4 mois, si réduction de la résistance de 10 % projetée => 1/ mois
		(5) résultats => comité si perte de résist 7,5 %				
(R-MB, 2011)	25.1	18 mois	1x/6 mois	25.2	6 mois	1x/4 mois (ou moins si réduction de la résistance de 10 % projetée)
(R-NU, 2014)	11.33	6 mois	1x/6 mois	11.34	6 mois	1x/4 mois (ou moins si réduction de la résistance de 10 % projetée)
		Résultats => « <i>chief inspector</i> »			Résultats => « <i>chief inspector</i> »	
(R-NL, 2012)	625 CSA Standard G4, "Steel Wire Rope for General Purpose and for Mine Hoisting and Mine Haulage"			-	-	-
Western Aus	11.62 (2 m, si nécessaire 2 m passé souvent sur la molette) 11.72 pr friction	6 mois	1x/6 mois	11.62 (meth non dest)	6 mois	1x/6 mois

Tableau 10. Règlements provinciaux (et australiens) sur les conditions de retrait des câbles d'extraction

Province	art	Allongement	Fils cassés	Charge rupture	Torsion	Temps	Autres
(R-QC, 2014)	293	< 60 % neuf	1 pas de toron > 5 % nb fils	< 90 % neuf	< 85 % neuf		Perte de section de 10 %
(R-ON, 2013)	228	< 60 % neuf	1 pas de toron > 5 % nb fils	< 90 % neuf	<i>Considerable loss</i>		Garder sur site les infos des raisons du retrait
(R-AB, 2003)	-	-	-	-	-	-	
(R-SK, 2003)	172	< 60 % neuf	1 pas de toron > 5 % nb fils ou augt° significative depuis dernière inspection	< 90 % neuf	-	2 ans (ou <i>valid chief inspector</i>)	Corrosion marquée ou défaut mettant en jeu la sécurité Prévenir <i>chief</i>
(R-YT, 2002)	-	-	-	-	-	-	-
(R-NT, 2003)	11.42 11.43 11.44	< 60 % neuf	1 pas de toron > 5 % nb fils	< 90 % neuf	<i>Considerable loss</i>	2 ans (ou <i>valid chief inspector</i>)	Corrosion marquée
(R-BC, 2008)	7.4.14 7.4.15	< 60 % neuf	1 pas de toron > 5 % nb fils	< 90 % neuf	-	-	Défaut mettant en jeu la sécurité Prévenir inspecteur si enlevé
(R-NB, 2011)	210	< 60 % neuf	1 pas de toron > 5 % nb fils	< 90 % neuf	-	-	-
(R-NS, 2008)	335(7)	< 60 % neuf	1 pas de toron > 5 % nb fils	< 90 % neuf	-	-	Prévenir directeur si enlevé
(R-MB, 2011)	24.10	< 60 % neuf	1 pas de toron > 5 % nb fils	< 90 % neuf	-	-	Corrosion marquée ou défaut mettant en jeu la sécurité Date et raison pour inspecteur
(R-NU, 2014)	210	< 60 % neuf	1 pas de toron > 5 % nb fils	< 90 % neuf	-	-	-
(R-NL, 2012)	627	-	-	-	-	-	Quand défaut ou faiblesse observé : arrêt de service
Western Aus	11.45	-	-	< 90 % neuf	-	-	Inspection physique / non destructive par personne compétente prouve un risque
NSW	MDG3 3.7		15 % dans un toron (<i>strand</i>), ou 40 % des torons externes 1 fil à proximité d'une extrémité ...		Beaucoup de critères...		Perte section non uniforme 5 %, ou uniforme 8 %

ANNEXE IV : GLOSSAIRE FRANÇAIS – ANGLAIS

Français (RSSM/ce rapport)	Anglais (ce rapport)	Anglais (RSSM)	Anglais (Autre Canada)	Royaume- Uni	États-Unis	Afrique du Sud	Australie
Angle de déflexion	Fleet angle	-	-	-	-	-	Fleet angle
Angle d’ouverture (molette)	Groove angle	-	-	-	-	-	-
Arbre de défaillance	Fault tree	-	-	-	-	-	-
Câble à toron rond	Round strand	-	Round strand	Round strand	-	Round strand	-
Câble à toron triangulaire	Triangular strand	-	-	Triangular strand	-	Triangular strand	-
Câble clos	Full locked coil	Locked-coil wire rope	Lock coil	Full locked coil	-	Full locked coil	Full locked coil
Câble d’extraction	Hoisting rope	Hoisting rope	Hoisting rope	Winding rope	Hoisting rope	Hoisting rope	Hoisting rope Winding rope
Câble d’équilibre	Balance rope	Tail rope	Tail rope Balance rope	Balance rope	-	-	Balance rope
Câble de frottement	Rubbing rope	Rubbing rope	Rubbing rope	Rubbing rope	-	-	Rubbing rope
Câble guide	Guide rope	Guide rope	Guide rope	Guide rope	-	-	Guide rope
Câble multi torons	Multi-strand	-	-	Multi-strand	-	Multi-strand	-
Câble plat	Flat rope	-	-	Flat rope	-	Flat rope	-
Câble semi-clos	Half locked coil	-	-	Half locked coil	-	Half locked coil	-
Câble traînant	Trailing rope	-	-	-	-	-	-
Coupe minimale	Minimal cut set	-	-	-	-	-	-
Coupe	Cut set	-	-	-	-	-	-

Cuffat	Bucket	Bucket	Bucket	Bucket	Bucket	-	Kibble
Essai de chute libre	Free fall test	Free fall test	Free fall test	-	-	-	-
Essai de dégagement rapide	Drop test	Quick release test	Drop test Quick release test	-	-	-	-
Molette	Sheave	Headsheave	Sheave Head sheave	Headframe pulley Sheave	Guide pulley Head sheave	-	Sheave Head sheave Winding sheave Head pulley
Mou de câble	Slack rope	Slack rope	Slack rope	Slack rope	Slack rope	Slack rope	Slack rope
Parachute	Safety catches	Safety catches	Safety catches Safety dogs	-	Safety catches Safety dogs	-	Gripper system
Pas toron	Rope lay	Rope lay	Rope lay	Rope lay	Rope lay	Rope lay	Rope lay
Toron	Strand	Strand	Strand	Strand	Strand	Strand	Strand
Transporteur	Conveyance	Conveyance	Conveyance	Conveyance	Conveyance	Conveyance	Conveyance
Treuil à tambour	Drum hoist	Drum hoist	Drum hoist	-	-	Drum winder	Drum winder
Treuil à friction	Friction hoist	Friction hoist	Friction hoist	-	-	Friction winder	Friction winder