

**Modernisation des parachutes  
de transporteurs de mines**  
Volet 2 – Cas de la rupture du câble

Laurent Giraud, ing.  
Bertrand Galy, ing.

RAPPORT D'EXPERTISE  
*DIFFUSION PUBLIQUE*

QR-1157-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 (IRSSST) 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'IRSSST 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'IRSSST peuvent être téléchargées gratuitement. [www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)

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

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

### Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2022  
ISBN 978-2-89797-204-2 (PDF)

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

IRSSST - 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](mailto:publications@irsst.qc.ca)  
[www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)

# **Modernisation des parachutes de transporteurs de mines**

## Volet 2 – Cas de la rupture du câble

Laurent Giraud, ing., Bertrand Galy, ing.

IRSST

RAPPORT D'EXPERTISE  
*DIFFUSION PUBLIQUE*

QR-1157-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)<sup>1</sup>. 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. Un premier volet, déposé le 5 juin 2014<sup>2</sup>, a présenté une revue de la littérature générale sur les parachutes et les câbles d'extraction. Ce deuxième volet porte sur les solutions envisageables afin d'éviter la rupture du câble et l'écrasement de la cage en cas de rupture du câble.

Le cas de l'écrasement de la cage d'une machine d'extraction est un cas limite lorsque l'on considère la probabilité d'occurrence de l'évènement et la gravité du dommage. En effet, la revue des accidents présentée dans le volet 1 a montré que les cas d'écrasement de la cage subséquents à une rupture de câble étaient rares, mais lorsque ce type d'évènement se produit, le nombre de blessés ou de décès peut être élevé. La question de la nécessité d'un système de sécurité comme les parachutes peut donc se poser : vaut-il mieux porter l'attention et les efforts sur le câble (comme en Afrique du Sud) ou un système parachute est-il intéressant compte tenu de son faible coût et de la sécurité supplémentaire qu'il apporte?

Le deuxième chapitre présente les solutions envisageables pour éviter la rupture du câble d'extraction et la législation qui s'y rattache. Les travaux de recherche effectués en Afrique du Sud ont montré qu'il est difficile d'anticiper les dégradations d'un câble et que des règles générales ne peuvent être édictées. Cependant, l'ensemble législatif et normatif en Afrique du Sud permet de limiter la propagation des causes élémentaires avant qu'elles ne créent un accident. De nombreux paramètres interviennent dans l'usure d'un câble et une bonne connaissance de ces mécanismes est nécessaire pour anticiper un affaiblissement éventuel. La résistance à la rupture d'un câble peut varier fortement sur sa longueur, et la résistance la plus faible est rarement à l'attache. Les critères de remplacement des câbles varient un peu d'une province à l'autre au Canada, mais aucune des provinces ne suggère de considérer les effets cumulatifs, contrairement à la norme SABS0293 et à la norme ISO 4309. La considération des effets cumulatifs nous semble être une pratique à mettre en œuvre pour accroître la sécurité, quel que soit le facteur de sécurité utilisé.

Pour évaluer la résistance des câbles, on peut se baser sur un examen visuel, un examen électromagnétique ou encore un système de suivi continu de l'état du câble. Les examens visuels devraient être faits dans de bonnes conditions d'éclairage et de visibilité. Deux paramètres sont mesurés lors des essais électromagnétiques : la perte de section métallique – *Loss of Metallic Area* (LMA) et les défauts localisés – *Localized Faults* (LF). Les essais électromagnétiques fournissent des informations précieuses sur « l'état de santé » du câble d'extraction, particulièrement pour l'intérieur du câble qui n'est pas visible. Néanmoins, l'appareillage permettant ce type de test n'est pas parfait et il comporte certaines limitations : la sensibilité

---

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

<sup>2</sup> Rapport d'expertise ([QR-1156-fr](#)) rendu public sous la référence Giraud et Galy, 2022.

décroit avec la profondeur du défaut, certains fils cassés internes ne sont pas toujours détectables et l'expérience du technicien est déterminante. Un programme de formation et de certification des inspecteurs de câbles paraît une option tout à fait appréciable. Les systèmes de suivi continu du câble, qui sont obligatoires pour abaisser le facteur de sécurité (FS), permettent de suivre en temps réel l'état du câble et procurent un avantage considérable lors des inspections électromagnétiques ponctuelles, car ils permettent de concentrer les efforts sur les zones identifiées comme affaiblies.

Trois voies sont à privilégier pour maximiser la durée de vie des câbles d'extraction : l'entretien régulier des câbles, la limitation des charges dynamiques et l'utilisation de câbles de nouvelle génération (câbles mixtes, câbles synthétiques). Des systèmes de lubrification automatique sont disponibles et permettent, en les connectant à un *Programmable Logic Controller* (PLC) de pulvériser du lubrifiant sur toute la longueur du câble après un certain nombre de cycles. Un contrôle strict du freinage permet de limiter les charges dynamiques dans le câble et donc de prolonger sa durée de vie; en effet, la majorité des événements élémentaires menant à une rupture du câble par dépassement de la charge est liée à des charges dynamiques. Enfin, les câbles mixtes sont de plus en plus courants dans les puits de mine et permettent d'augmenter les charges admissibles sans compromettre la sécurité des travailleurs. À plus long terme, il sera probablement possible d'utiliser des câbles 100 % synthétiques, ce qui demandera une adaptation de la législation.

Les parachutes traditionnels en service aujourd'hui au Québec sont presque tous de type « Ontario », c'est-à-dire qu'il s'agit de parachutes à une seule dent par côté de guide, munis d'un fendeur (*splitter*) afin d'écarter le bois arraché au guide, ainsi que d'un patin permettant d'éviter le retournement de la dent et de compenser partiellement l'usure des guides.

La décélération engendrée par ce type de système de sécurité pour les transporteurs est relativement grande : de l'ordre de 3 g (29,43 m/s<sup>2</sup>), ce qui a motivé la demande de la présente expertise. Si ces décélérationes peuvent générer des blessures aux travailleurs présents dans la cage, plusieurs cas ont été observés où il n'y a pas eu de blessures avec des décélérationes de cet ordre. Le problème se pose surtout pour les cages presque vides, pour lesquelles la décélération sera plus grande.

En utilisant le principe de conservation d'énergie, on peut calculer la force de freinage F (résistance moyenne du bois). Cette force de freinage par dent peut être estimée à l'aide d'équations empiriques qui ont été données par les fabricants de parachutes. Il apparaît que cette force F est influencé par les dimensions de la dent (largeur et profondeur de coupe) ainsi que par l'angle qu'elle fait par rapport à l'horizontale. Plus cet angle est faible, plus la force de freinage sera grande. Ces équations ne sont pas parfaites, mais permettent une estimation relativement bonne, et plutôt conservatrice, de la force de freinage par dent.

Le parachute de type « Ontario » prévoit un système de compensation de l'usure des guides. L'efficacité de ce système a été évaluée. Il apparaît que plus l'angle de la dent est faible, moins le système de compensation est en mesure de limiter la perte de force de freinage. Pour un guide gonflé par l'humidité, la force de freinage diminuera pour un angle de dent faible et augmentera pour un angle de dent supérieur à 10°. Si le guide fait exactement la largeur nominale, la contribution au freinage du patin peut être estimée à 8 % environ.

De nombreux résultats d'essais de chute libre ont été récupérés et compilés : quelle que soit la forme de la dent, son angle, le taux d'humidité des guides, la force de freinage par surface ( $F/T$ ) est presque toujours comprise entre 3000 et 5000 lb/po<sup>2</sup>. La force de freinage  $F$  peut être considérée comme constante pour une géométrie de dent et une essence de bois donnée. Ainsi, à partir des résultats de l'essai de chute libre à pleine charge, il est possible d'estimer la décélération pour la cage à vide (ou avec très peu de travailleurs). En particulier, pour des essais conduits à la *Colorado School of Mines*, où la décélération à pleine charge a été mesurée à 0,6 g, on retrouve par calcul la décélération à vide (3,4 g). Pour ce cas particulier, on peut noter que dans la plupart des provinces canadiennes, le système parachute aurait été rejeté (décélération inférieure à 0,9 g ou 1 g). En considérant la même cage avec une décélération de 1 g à pleine charge, on peut estimer que la décélération serait de l'ordre de 5 g avec 1 travailleur (au lieu de 72 à capacité maximale).

L'arbre de défaillance comporte quarante-huit événements élémentaires. Le retour d'expérience accumulé sur les parachutes traditionnels conjugué aux prescriptions réglementaires et à l'utilisation de dents de type Ontario permettent d'éliminer certains événements élémentaires de l'arbre de défaillance. L'adéquation mécanisme / dents / guide des parachutes traditionnels génère onze événements élémentaires qui peuvent entraîner un freinage limité, voire très limité du parachute. Il faut donc surveiller étroitement l'état des guides en bois, l'usure des guides et des dents, la position des dents par rapport aux guides et veiller à ce que les essences de bois soient les mêmes pour tous les guides en vis-à-vis.

Les parachutes modernes (système de freinage d'urgence de type pince de serrage) sont fonctionnels sur des guides en acier et leur principe de fonctionnement est similaire à celui des freins à disque : le guide en acier est enserré par deux patins munis de garnitures de freinage. Deux systèmes évolués disponibles sur le marché ont été étudiés. Ces deux systèmes sont des évolutions de systèmes qui servent à faire du positionnement.

L'ajout à l'un des systèmes de positionnement d'un accumulateur d'énergie sur le toit de la cage permet d'appliquer les freins en cas de rupture du câble. De plus, un signal est envoyé à la machine d'extraction dès que les freins sont appliqués pour éviter, par exemple, que le câble ne s'empile sur le toit de la cage. Cependant, la fiabilité de cette fonction de sécurité dépend de la communication entre la cage et la machine d'extraction. Ce système évolué est installé dans quelques mines hors du Québec, mais le retour d'expérience est encore très limité. Les compagnies minières craignent notamment l'application non désirée des freins lors de l'opération normale de la cage (freinage intempestif), ce qui pourrait générer des blessures pour les travailleurs. Il est muni de plusieurs redondances pour le rendre plus fiable. De nombreux essais de dégagement rapide ont été faits ainsi que quelques essais de chute libre. L'essai réalisé en Ontario (cage vide) a mis en évidence une décélération plus douce (1,4 g) qu'avec les parachutes traditionnels. Des essais à pleine charge devraient être faits en Afrique du Sud. Comme il est possible d'ajuster la pression d'application des patins sur les guides, il est théoriquement possible de contrôler la décélération en fonction de la charge de la cage. Les systèmes standards de positionnement sont installés un peu partout sur le globe et ce type de système a fait ses preuves au cours des années. Néanmoins, une correspondance avec un utilisateur du système évolué a soulevé de nombreux problèmes de fiabilité qui empêchent le système d'être utilisé au quotidien. Ce système semble devoir être fiabilisé avant que son usage ne soit généralisé.

Le second système évolué n'était, à notre connaissance en 2015, pas encore installé sur une cage. Le volume d'information trouvé pour ce système est restreint comparativement au premier. Selon le fabricant, le principal avantage est l'utilisation d'un circuit hydraulique fermé : contrairement au système évolué précédent qui doit avoir une source d'approvisionnement en air comprimé à chaque station, alors que ce système a un compresseur alimenté par batterie installé sur la cage. Ce circuit hydraulique fermé permet d'éviter l'introduction de polluants et diminue ainsi le risque de mauvais fonctionnement. Cependant, il faut signaler que tous les documents concernant le second système évolué ont été retirés du site du fabricant durant l'étude en 2014-2015, et que le contact initié avec eux n'a finalement pas abouti.

Les parachutes modernes permettent d'éliminer des événements élémentaires présents dans l'arbre de défaillance des parachutes classiques. Cependant, d'autres événements élémentaires doivent être ajoutés à l'arbre et les probabilités d'occurrence des différents événements sont ainsi modifiées. Il faut alors prendre en considération toutes ces modifications pour évaluer la sécurité globale du système. Les parachutes modernes en sont à leurs débuts et leur développement sera dicté par l'utilisation de guides en acier. D'ici là, quelques pistes de recherche pourraient être envisagées afin de les rendre au minimum aussi fiables que les parachutes traditionnels, notamment : la communication cage / machine d'extraction, le déclenchement intempestif des parachutes en montée et l'utilisation de l'électronique.

Enfin, la mission des parachutes devrait être enrichie afin d'assurer la sécurité des travailleurs lors d'une défaillance mécanique ou lors d'une défaillance du système de commande de la machine d'extraction.

Une série de recommandations est proposée à la fin de chaque chapitre, pour un total de 24 recommandations.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>AVIS DE NON-RESPONSABILITÉ .....</b>	<b>i</b>
<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>iii</b>
<b>SOMMAIRE EXÉCUTIF.....</b>	<b>v</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>xiii</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>xv</b>
<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ANALYSE DE RISQUE .....</b>	<b>3</b>
2.1 Notion ALARP.....	5
2.2 Analyse coûts/bénéfices .....	6
<b>3. ÉVITER LA RUPTURE DU CÂBLE.....</b>	<b>9</b>
3.1 Législations et normes applicables en Afrique du Sud .....	9
3.2 Comportement des câbles, usure et retrait de service .....	12
3.2.1 Travaux de recherche en Afrique du Sud : comportement et durée de vie des câbles d'extraction.....	12
3.2.2 Causes d'usure et de rupture des câbles.....	13
3.2.3 Critères de retrait des câbles.....	18
3.3 Évaluer la résistance des câbles par des essais ou examens non destructifs afin d'éviter d'arriver à la rupture.....	20
3.3.1 Examens visuels .....	20
3.3.2 Essais électromagnétiques.....	21
3.3.3 Suivi en continu des câbles d'extraction .....	23
3.4 Maximiser la sécurité des câbles .....	26
3.4.1 Entretien des câbles et lubrification .....	26
3.4.2 Limitation des charges dynamiques.....	28
3.4.3 Utilisation de câbles de nouvelle génération : les câbles mixtes .....	29
3.5 Arbre de défaillance.....	32
3.6 Synthèse et recommandations.....	32
<b>4. PARACHUTES TRADITIONNELS .....</b>	<b>35</b>
4.1 Considérations générales .....	36
4.1.1 Le parachute de type « Ontario » à dent simple .....	36
4.1.2 La décélération et les facteurs l'influençant .....	39
4.1.3 Mise en équation de la décélération .....	42

4.2	Effet des dents des parachutes dans le bois.....	43
4.2.1	Principe général .....	43
4.2.2	Relations empiriques de la force de freinage F par dent.....	44
4.2.3	Système de « compensation » de l'usure .....	47
4.2.4	Contribution du patin au freinage.....	53
4.3	Compilation de résultats d'essais.....	55
4.3.1	Sources de résultats d'essais .....	55
4.3.2	Comparaison des résultats d'essais et discussion.....	55
4.4	Arbre de défaillance.....	61
4.5	Synthèse et recommandations.....	63
<b>5.</b>	<b>PARACHUTES MODERNES.....</b>	<b>67</b>
5.1	Le passage des guides en bois aux guides en acier .....	67
5.2	Les parachutes à coin d'écartement .....	67
5.3	Système évolué #1 .....	68
5.3.1	Du système de base au système évolué .....	69
5.3.2	Performance du système évolué .....	70
5.3.3	Mise en œuvre in situ .....	71
5.3.4	Sécurité et retour d'expérience .....	72
5.4	Système évolué #2 .....	73
5.4.1	Du système de base au système évolué .....	73
5.4.2	Performance du système évolué et mise en œuvre in situ.....	74
5.4.3	Sécurité et retour d'expérience.....	74
5.5	Questionnements sur la fiabilité des parachutes modernes .....	75
5.5.1	Communication cage/machine d'extraction .....	77
5.5.2	Déclenchement intempestif des parachutes en montée.....	78
5.5.3	Utilisation de l'électronique .....	78
5.5.4	Compatibilité des parachutes modernes avec des guides en bois.....	79
5.6	Effets sur l'arbre de défaillance .....	79
5.7	Synthèse et recommandations.....	81
<b>6.</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>85</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>89</b>
	<b>ANNEXE I : LISTE DES RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>95</b>
	<b>ANNEXE II : DÉFINITIONS .....</b>	<b>99</b>
	<b>ANNEXE III : TYPE ET USURE DES CÂBLES D'EXTRACTION.....</b>	<b>103</b>
	<b>ANNEXE IV : LE RABOTAGE ORTHOGONAL .....</b>	<b>107</b>

**ANNEXE V : RESULTATS DU RAPPORT DE LA COLORADO SCHOOL OF MINES.....111**

**ANNEXE VI : ARBRES DE DÉFAILLANCE.....113**





## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Valeur monétaire d'une vie humaine .....	8
Tableau 2.	Systèmes de suivi en continu des câbles d'extraction .....	23
Tableau 3.	Effets de la force du ressort par rapport au poids de la cage à vide .....	37
Tableau 4.	Accélérations subies par des humains et leurs effets .....	40
Tableau 5.	Intervalle de décélération autorisés dans les réglementations provinciales .....	41
Tableau 6.	Constante C pour l'équation (4.6) .....	44
Tableau 7.	Constantes C1 et C2 pour l'équation (4.7) .....	44
Tableau 8.	Propriétés géométriques .....	48
Tableau 9.	Coordonnées des points B et C .....	49
Tableau 10.	Propriétés géométriques .....	51
Tableau 11.	Coordonnées des points B et C .....	52
Tableau 12.	Résultats d'essais de chute libre utilisés .....	55
Tableau 13.	Résistance moyenne du bois en fonction de l'angle $\beta$ et de l'humidité .....	56
Tableau 14.	Résistance moyenne du bois, mesures effectuées en Ontario .....	57
Tableau 15.	Moyennes et écarts-types pour la profondeur de pénétration des dents en fonction de la vitesse et de l'hygrométrie du bois .....	58
Tableau 16.	Liste des événements élémentaires supprimés en lien avec les parachutes et explications .....	62
Tableau 17.	Moyens de réduction du risque pour les événements élémentaires restants .....	63
Tableau 18.	Avantages et inconvénients des systèmes parachutes .....	76
Tableau 19.	Comparaison des parachutes traditionnels à leurs équivalents modernes .....	77
Tableau 20.	Liste des événements élémentaires supprimés avec les parachutes modernes .....	80
Tableau 21.	Caractéristiques des câbles .....	103
Tableau 22.	Types de détérioration observables sur les câbles d'extraction .....	104
Tableau 23.	Valeurs de décélérations mesurées en faisant varier la largeur des dents et la vitesse .....	111



## LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Processus accidentel.....	1
Figure 2.	Situation pour le cas de l'écrasement de la cage. ....	3
Figure 3.	Mesures envisageables pour ramener le risque à un niveau acceptable.....	4
Figure 4.	Limites ALARP.....	6
Figure 5.	Fil déplacé à cause de l'usure.....	13
Figure 6.	Câble présentant une corrosion externe avancée et probablement de la corrosion interne. ....	14
Figure 7.	Déformation en panier (a) et distorsions (b et c).....	16
Figure 8.	Résistance à la rupture en fonction de la position sur le câble. ....	17
Figure 9.	Identification automatique des défauts sur les câbles à l'aide d'un système à caméra.....	24
Figure 10.	Photo d'un système de suivi en continu du câble.....	25
Figure 11.	Brosse métallique pour le nettoyage des câbles. ....	27
Figure 12.	Lubrification automatique du câble.....	28
Figure 13.	Conception de câble mixte (4 : cœur en Kevlar, 13 : torons en acier). ....	30
Figure 14.	Augmentation de la charge en fonction de la longueur du câble et de la réduction de son poids propre.....	30
Figure 15.	Coupe typique pour un câble à torons triangulaires (à gauche) et un câble avec un cœur entouré de plastique (à droite).....	31
Figure 16.	Principe de fonctionnement des parachutes traditionnels.....	35
Figure 17.	Parachute de type « Ontario », à dent simple. ....	37
Figure 18.	Mécanisme anti traîne de câble. ....	39
Figure 19.	Notations pour l'angle de la dent.....	42
Figure 20.	Principe de fonctionnement du parachute de type « Ontario ». ....	43
Figure 21.	Comparaison des équations 4.6, 4.7 et 4.8 en fonction des trois paramètres, P, L et $\alpha$ . ....	45
Figure 22.	Comparaison des résultats prévus par l'équation 4.7 aux mesures in situ pour $\alpha = 12^\circ$ . ....	46
Figure 23.	Erreur relative F/dent mesurée vs prévue (Eq. 4.7).....	46
Figure 24.	Parachute de type « Ontario », notations dans le cas où le guide est utilisé.....	48
Figure 25.	Pénétration de la dent en fonction de l'usure du guide.....	49
Figure 26.	Diminution de la force de freinage par dent en fonction de l'aire de coupe.....	50

---

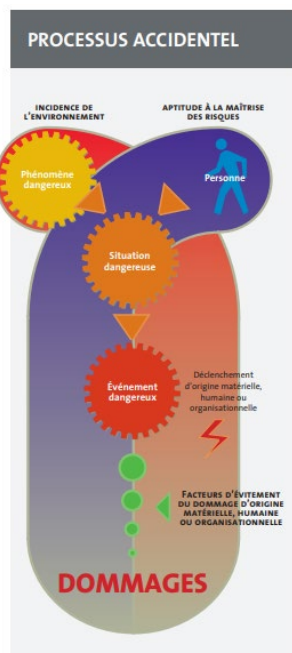
Figure 27.	Parachute de type « Ontario », notations dans le cas où le guide est trop gros.....	51
Figure 28.	Pénétration de la dent en fonction du gonflement du guide.....	52
Figure 29.	Variation de la force de freinage par dent ( $F_d$ ) en fonction de l'aire de coupe.....	53
Figure 30.	Parachute de type « Ontario », notations pour le calcul de la contribution au freinage du patin. ....	54
Figure 31.	Résistance moyenne ( $F/T$ ) en fonction de la décélération.....	56
Figure 32.	Profondeur réelle d'engagement des dents (1 po nominal) en fonction de la vitesse de chute libre. ....	57
Figure 33.	Décélération et distance d'arrêt en fonction du nombre d'occupants dans la cage.....	59
Figure 34.	Décélération et distance d'arrêt en fonction du nombre d'occupants dans la cage (en imposant $a = 1g$ ou $2g$ à cage pleine).....	60
Figure 35.	Friction wedge shoes.....	68
Figure 36.	Décélération enregistrée lors d'une chute libre. ....	71
Figure 37.	Types de dommages observables sur les câbles.....	106
Figure 38.	Géométrie de la coupe orthogonale et des composantes de la force de coupe résultante. ....	108
Figure 39.	Principaux types de coupe orthogonale. ....	108
Figure 40.	Copeau de type I, obtenu en direction $90^\circ-0^\circ$ , à un angle d'attaque de $25^\circ$ et 1,14 mm de profondeur de coupe. ....	109
Figure 41.	Copeau de type II, obtenu en direction $90^\circ-0^\circ$ , à un angle d'attaque de $15^\circ$ et 1,14 mm de profondeur de coupe. ....	109
Figure 42.	Résistance moyenne en fonction de la décélération (et résistance moyenne ajustée par rapport à la profondeur réelle des dents, au lieu du 1 po nominal).....	112

## 1. INTRODUCTION

Une lettre signée par un représentant de la partie syndicale du sous-comité des machines d'extraction de la CSST, 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 à la figure 1. Pour le cadre de cette étude, le dommage considéré 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 :
  - Quel parachute utiliser (facteur d'évitement)?
  - Comment limiter la probabilité d'occurrence de l'évènement dangereux?
- Évènement dangereux = perte de contrôle de la descente 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, événements 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 comporte donc trois volets principaux :

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

Un premier rapport faisant la revue des systèmes parachutes, des systèmes de freinage d'urgence et des législations provinciales et internationales a été remis le 5 juin 2014 à la CSST<sup>3</sup>. Le présent rapport traite du deuxième volet du mandat, soit le cas où l'évènement dangereux est la rupture du câble.

Le rapport comprend une brève introduction à l'analyse de risque. Par la suite, une section s'intéresse plus particulièrement à la rupture du câble (types de câbles, causes d'usure, causes de rupture, suivi continu, examens ponctuels). Les deux dernières sections portent sur les parachutes, traditionnels et modernes, et comment ces parachutes permettent d'éliminer certaines causes d'accident (ou coupes) identifiées sur l'arbre de défaillance.

À la fin du rapport sont présentées des annexes qui incluent :

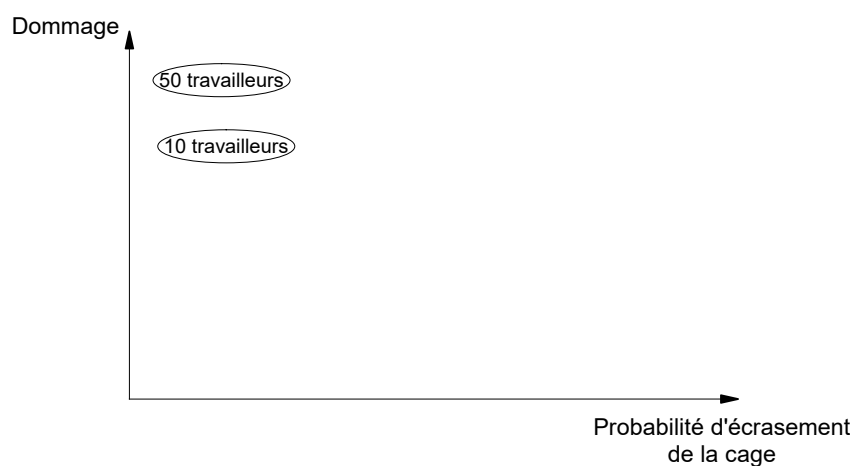
- l'ensemble des recommandations formulées dans le rapport (annexe I);
- des définitions générales afin d'aider le lecteur à la compréhension du texte (annexe II);
- des précisions sur les types de dommages observables sur les câbles et l'usure des câbles en général (annexe III);
- des précisions sur le rabotage orthogonal (annexe IV);
- des résultats complémentaires extraits du rapport de la *Colorado School of Mines* (annexe V);
- l'arbre de défaillance (annexe VI).

---

<sup>3</sup> Rapport d'expertise ([QR-1156-fr](#)) rendu public sous la référence Giraud et Galy, 2022.

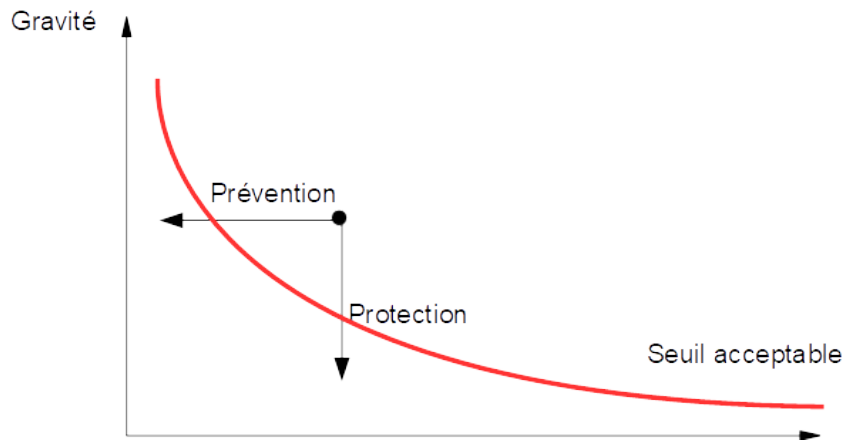
## 2. ANALYSE DE RISQUE

La revue des accidents d'écrasement de la cage dans le Volet 1 du rapport (Giraud et Galy, 2022) a montré que la probabilité d'occurrence était relativement faible. Par contre, l'occurrence d'un tel évènement peut avoir de très graves conséquences : l'écrasement de la cage peut entraîner la mort de plusieurs travailleurs. Avec l'évolution actuelle des pratiques minières, on assiste à la mise en œuvre de cages de plus en plus grandes. Ainsi, à probabilité d'écrasement de la cage égale, le niveau de dommage augmente. La situation illustrée à la figure 2 devient donc de moins en moins confortable, car le risque augmente.



**Figure 2. Situation pour le cas de l'écrasement de la cage.**

La figure 3 montre une courbe de seuil de risque acceptable et les deux actions possibles envisageables pour amener une situation dangereuse en dessous du seuil acceptable : soit on diminue la probabilité d'occurrence en prenant des mesures préventives (flèche horizontale), soit on augmente les protections (flèche verticale) en réduisant la gravité du dommage (Flaus, 2014). Bien entendu, il est tout à fait envisageable d'utiliser ces deux mesures conjointement afin de réduire, et la gravité, et la probabilité du dommage.



**Figure 3. Mesures envisageables pour ramener le risque à un niveau acceptable.**

Adapté de « L'analyse des risques industriels », par J.-M. Flaus, 2014, *Industrie & Technologies*, (964), p. 59.  
©Infopro Digital, 2014.

Le risque est défini de la manière suivante par le *Health and Safety Executive* (HSE) (2014a) : c'est la probabilité qu'un danger produise un effet indésirable, incluant une mesure de l'effet non désiré (gravité). Selon la norme ISO 31 000, le risque est défini comme l'effet de l'incertitude sur les objectifs (où l'effet est l'écart positif ou négatif par rapport à une attente). Il semble que la définition donnée par le HSE (et plus couramment utilisée en ingénierie) est plus parlante pour le cas des mines.

La probabilité d'écrasement de la cage peut être estimée par un premier calcul en se basant sur les 8 accidents/incidents liés à la chute ou l'écrasement de la cage et recensés au cours des 25 dernières années au Québec (Giraud et Galy, 2022) :

$$P = \text{nombre d'accidents/nombre d'heures}$$

En supposant une durée de 25 ans, 30 machines d'extraction fonctionnelles, 10 h/jour en moyenne, 5 j/sem. et 50 sem./an, on obtient un total de :  $25 \times 30 \times 10 \times 5 \times 50 = 1\,875\,000$  h de fonctionnement en tout.

Soit une probabilité  $P = 4,27 \times 10^{-6}$  accident/h ce qui est du même ordre de grandeur que l'aviation commerciale :  $2 \times 10^{-6}$  accident/segment de vol en 2014 (IATA, 2015).

Ce résultat est cohérent, pour la période 1983-2001 en Ontario, avec les données disponibles (Wedzicha, 2002). Wedzicha mentionnait que 56 incidents ont été répertoriés pour les 64 machines d'extraction en opération. Cependant, seuls 9 incidents sont liés à la chute ou à l'écrasement de la cage au fond du puits en 19 ans (1983-2001), et seulement 30 cages étaient équipées de parachutes, ce qui donne une probabilité de  $6,3 \times 10^{-6}$  accident/h. Par contre, au Québec, le nombre d'accidents recensés est certainement minimisé par rapport à la réalité, car il n'existe pas de base de données sur les accidents survenus dans les puits de mine.



La quantification étant relativement imprécise, il faut donc juger les probabilités avec précaution, car il peut y avoir un ordre de grandeur de différence avec la réalité (Etherton, 2007). C'est notamment le cas pour les centrales nucléaires, où les incidents sont beaucoup plus nombreux qu'anticipés.

## 2.1 Notion ALARP

La notion de modèle ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*) a été définie dans un jugement de 1949 en Grande-Bretagne<sup>4</sup>, et a été intégrée en 1974 dans le *Health and Safety at Work etc. Act*. Rendre un risque ALARP ne signifie pas faire *tout* ce qui est physiquement possible, mais faire ce qui est raisonnable (on peut alors se référer au concept d'analyse coûts/bénéfices) (HSE, 2014a; NOPSEMA, 2012) pour réduire le niveau de risque. Au final, un risque réduit en appliquant ce modèle ALARP ne sera pas nécessairement un risque nul (qui n'existe d'ailleurs pas en pratique).

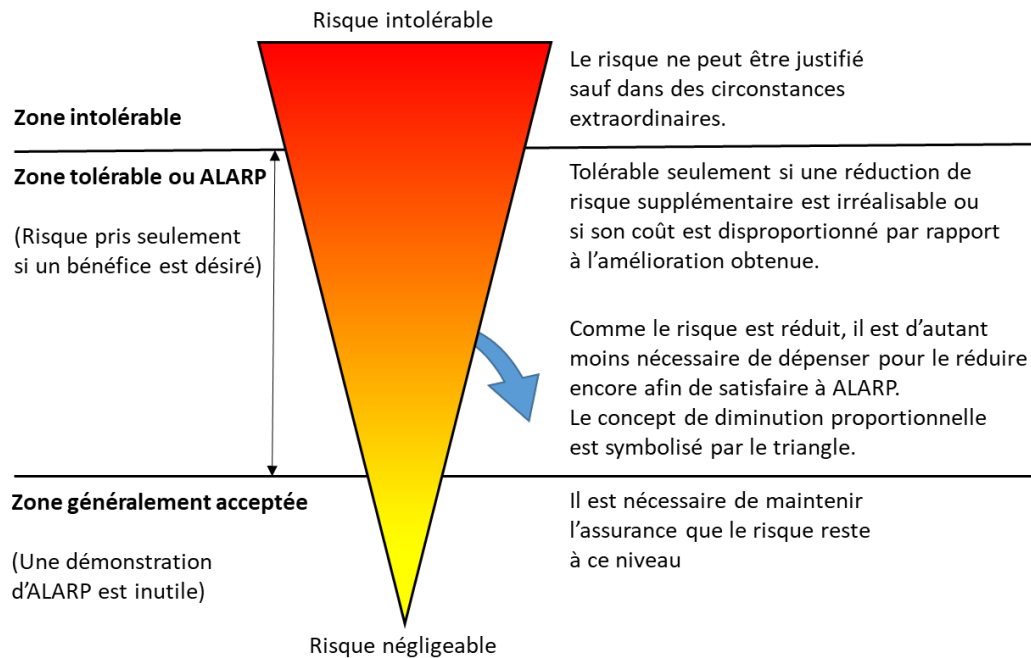
Ce concept offre une grande flexibilité au législateur (en Grande-Bretagne, et en Australie), mais aussi aux compagnies. Par contre il nécessite des études sérieuses pour les cas particuliers (sinon on se réfère souvent aux « bonnes pratiques »), et dans certains cas il est difficile de dire si le risque est ALARP (HSE, 2014a; NOPSEMA, 2012). Dans le choix des options, on doit justifier qu'on est au risque minimum ou justifier pourquoi le niveau est ALARP (NOPSEMA, 2012). La « bonne pratique » est une base intéressante, mais elle ne doit en aucun cas se substituer au jugement et à la réflexion. Par ailleurs, les bonnes pratiques sont amenées à changer avec les évolutions techniques.

Il y a deux limites au concept ALARP (Etherton, 2007) [Figure 4] :

1. La limite inférieure, pour laquelle le niveau de risque est généralement accepté tel quel;
2. La limite supérieure, pour laquelle le niveau de risque est intolérable.

---

<sup>4</sup> “Reasonably practicable’ is a narrower term than ‘physically possible’ ... a computation must be made by the owner in which the quantum of risk is placed on one scale and the sacrifice involved in the measures necessary for averting the risk (whether in money, time or trouble) is placed in the other, and that, if it be shown that there is a gross disproportion between them – the risk being insignificant in relation to the sacrifice – the defendants discharge the onus on them.”



**Figure 4. Limites ALARP.**

Entre les deux limites, il faut faire une analyse coûts/bénéfices (Etherton, 2007). Pour réduire le risque, les mesures que l'on peut prendre sont, soit d'ordre technique (hardware ou software), soit d'ordre humaine ou organisationnelle (management, procédures) (NOPSEMA, 2012). Quand on est proche de la limite inférieure, on peut se limiter aux cas où les bénéfices sont plus grands que les coûts engagés.

## 2.2 Analyse coûts/bénéfices

Lors d'une analyse coûts/bénéfices, si le bénéfice est supérieur au coût d'intervention, il devient intéressant de modifier le système, même s'il n'y a pas d'obligation légale (Gauvin, 2011). Le HSE introduit également un facteur de disproportion (FD) et indique qu'on peut s'abstenir de modifications au système si (HSE, 2014b) :

$$\frac{\text{coûts}}{\text{bénéfices}} > 1 \times FD \quad (1.1)$$

Ainsi, une mesure est raisonnable à moins que le coût soit grandement disproportionné par rapport aux bénéfices. Cependant, une analyse coûts/bénéfices ne peut être utilisée pour aller à l'encontre des bonnes pratiques, des règlements, ou pour justifier une étude d'ingénierie de mauvaise qualité. Si les coûts sont très élevés pour une réduction de risque marginale, il est probable que le risque soit déjà ALARP (HSE, 2014a).

Le HSE donne quelques exemples extrêmes où la prise de décision est aisée, dans la réalité, les limites sont souvent plus floues (HSE, 2014a) :

- 1 M\$ pour éviter que 5 personnes aient des bleus aux genoux : pas rentable;
- 1 M\$ pour éviter une explosion qui pourrait tuer plusieurs personnes : on fait la modification.

Dans le cas de l'écrasement de la cage, il est possible de faire une première analyse coûts/bénéfices avec les paramètres suivants : des guides en acier sont utilisés dans le puits, il n'est donc pas possible d'utiliser un système de secours de type « parachute traditionnel », mais l'exploitant s'interroge sur la pertinence d'un dispositif équivalent pour les guides en acier.

Dans ce cas, le coût d'un tel dispositif est la somme du coût d'achat et d'installation du dispositif de secours de type « parachute à pince de serrage ». Pour les besoins de l'exemple, nous avons estimé ce coût à 0,6 M\$ (ce qui est peut-être plus élevé qu'en réalité).

Le bénéfice maximal escompté est l'évitement de l'écrasement de la cage avec le nombre maximal de mineurs autorisé, soit 56<sup>5</sup> travailleurs pour notre calcul. Il faut donc connaître la valeur monétaire d'une vie humaine [Tableau 1] ainsi que la probabilité d'écrasement de la cage pour un puits donné. Pour la valeur d'une vie humaine, nous prendrons la moyenne des valeurs utilisées au Canada [Tableau 1] lors des 20 dernières années, soit 5,04 M\$<sup>6</sup>. Pour la probabilité d'écrasement, nous reprendrons la valeur calculée précédemment, soit  $4,27 \cdot 10^{-6}$  accident/heure d'utilisation de la cage. Le bénéfice est donc d'environ 30 M\$ pour une utilisation de la cage 10 heures par jour, 5 jours par semaine et 50 semaines par an pendant 10 ans. ( $4,27 \cdot 10^{-6} \times 10 \times 5 \times 50 \times 10 = 0,106$  accident;  $0,106 \times 56 \times 5,04 = 30,1$  M\$).

---

<sup>5</sup> Des cages au Québec peuvent accueillir 56 mineurs.

<sup>6</sup> Environnement Canada, 1996 : 4,46 M\$; Santé Canada, 1999 : 4,57 M\$; Conseil du trésor du Canada, 2007 : 6,11 M\$.

**Tableau 1. Valeur monétaire d'une vie humaine**

Adapté de « Les coûts des lésions professionnelles : une revue de littérature » (Rapport n° R-676), par M. Lebeau et P. Duguay, 2011, p. 46. ©IRSST, 2011.

Pays	Année d'évaluation	Source	Valeur vie humaine (M\$ CA)
Australie	1999-2000	Department of Transport and Regional Services	0,31; 1,47; 1,17
Australie	2000	Commonwealth Bureau of Transport Economics	1,27
Australie	2002	NSW Roads and Traffic Authority	1,11
Grande-Bretagne	1996	SSTC, Services Fédéraux des Affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles	6,43
Canada	1991	Transport Canada	1,76
Canada	1996	Environnement Canada	4,46
Canada	1999	Santé Canada	4,57
Canada	2007	Conseil du trésor du Canada	6,11
Canada (QC)	2007	Ministère des transports du Québec	3,2
États-Unis	1996	Federal Aviation Administration (FAA)	3,71
États-Unis	1996	Food and Drug Administration (FDA)	3,34; 6,81
États-Unis	1999	Environmental Protection Agency	4,83; 7,8
États-Unis	2000	Consumer Product Safety Commission	6,19
États-Unis	2002	U.S. Department of Transportation	3,63
États-Unis	2009	U.S. Department of Transportation	5,8 (US)
Grande-Bretagne	1995	Commissariat General du Plan	1,18
Grande-Bretagne	1996	Department of Transport – Aviation	1,79
Grande-Bretagne	2001	Department of Transport – Road Safety	1,49
Norvège	1999	Public Roads Administration	2,18
Nouvelle-Zélande	1990	Land Transport Division, Ministry of Transport	2
Suède	1999	SIKA – Swedish National Road Administration	1,76

Le bénéfice, qui ne tient pas compte des pertes d'exploitation consécutives à l'écrasement de la cage, est donc largement supérieur au coût. Il est donc rentable de mettre en place un facteur d'évitement. Ce cas est même similaire à un des cas-écoles mentionnés par le HSE ci-dessus (cas de l'explosion).

Outre cet aspect coûts/bénéfices, il faut aussi considérer les répercussions de l'écrasement d'une cage impliquant un ou plusieurs décès en termes d'indignation de la population (Lavoie, 2011; Lefebvre, 2011), ceci se reflétant sur l'image de la compagnie voire sur celle de l'industrie minière dans son ensemble.

### 3. ÉVITER LA RUPTURE DU CÂBLE

Le premier moyen d'éviter l'écrasement de la cage est d'éviter la rupture du câble (en supposant que la position de la cage reste contrôlée par la machine d'extraction). Dans ce cas, l'objectif est de réduire la probabilité d'occurrence de l'évènement dangereux. À cet effet, il faut s'assurer que le type de câble choisi est le bon pour l'usage visé, que les modes d'usure et de rupture sont connus et compris, que l'entretien du câble est convenable et enfin, qu'un suivi régulier (sinon continu) de l'état du câble soit effectué. L'Annexe III présente un récapitulatif des grands types de câbles ainsi que les défauts observables lors de leur vieillissement.

Ce chapitre s'articule autour d'une constatation et de trois questions :

1. Législations et normes applicables en Afrique du Sud;
2. Comment s'usent les câbles et quand faut-il les retirer du service?
3. Comment évaluer la résistance et la durée de vie résiduelle des câbles au cours de leur vie?
4. Quelles mesures peut-on prendre pour améliorer la sécurité et/ou la durée de vie des câbles?

#### 3.1 Législations et normes applicables en Afrique du Sud

Pour atteindre un niveau de sécurité acceptable dans le cas des treuils miniers, l'Afrique du Sud a travaillé au niveau technique, humain et organisationnel. Pour diminuer les causes techniques à l'origine des accidents, de nombreuses recherches ont été menées pour mieux comprendre le comportement des câbles et bien estimer leur durée de vie (section 2.2.1). Pour diminuer les causes humaines et organisationnelles, l'Afrique du Sud a utilisé son cadre normatif et législatif.

Du point de vue normatif, la norme BS 6570 citée dans le code de pratique SABS 0293 (CSST, 2003a) est maintenant remplacée par la norme BS ISO 4309:2010 *Cranes. Wire ropes. Care and maintenance, inspection and discard* (ISO 4309, 2010). De plus, les codes de pratique SABS 0293 et SABS 0294 (CSST, 2003a; CSST, 2003b) sont maintenant les normes SANS 10293:1996 *Condition assessment of steel wire ropes on mine winders* (SANS, 1996) et SANS 10294:2000 *The performance, operation, testing and maintenance of drum winders relating to rope safety* (SANS, 2000).

Du point de vue législatif, il y a eu de nombreuses évolutions dans les lois et règlements miniers en Afrique du Sud. La *Mineral Act 50 of 1991*, citée dans les deux codes de pratique SABS 0293 et SABS 0294 n'existe plus. Cette loi a été amendée par la *Minerals Amendment Act 103 of 1993* (L-SA, 1993) et par la *Mine Health and Safety Act 29 of 1996* (L-SA, 1996). Par la suite, la *Minerals Amendment Act 103 of 1993* a été amendée par la *Mineral and Petroleum Resources Development Act 28 of 2002* (L-SA, 2002). Ces deux dernières lois, la *Mine Health and Safety Act 29 of 1996* et la *Mineral and Petroleum Resources Development Act 28 of 2002* ont été respectivement mises à jour en 2009 et 2013.

Plusieurs règlements ont été publiés en lien avec ces lois, dont :

- Mine Health and Safety Act 29 of 1996 – Regulations and Notices – Government Notice R93 (R-SA, 2013), règlement mis à jour en 2013 qui modifie les règlements associés à la Loi;
- Mine Health and Safety Act 29 of 1996 – Regulations and Notices – Government Notice R846 (R-SA, 2006), règlement adopté en 2006, qui crée un fonds de recherche en SST dans le domaine minier;
- Mine Health and Safety Act 29 of 1996 – Regulations and Notices – Government Notice R992<sup>7</sup> (R-SA, 2008), règlement mis à jour en 2008 qui modifie les règlements associés à la Loi.

Dans l'ensemble des lois, règlements, normes et codes de pratique, les volets humains et organisationnels sont fortement encadrés pour éviter toute dérive qui pourrait affecter la sécurité. Citons par exemple :

- L'équipement utilisé pour l'évaluation de la condition d'un câble (voir section 2.3.2) doit être approuvé par un agent désigné par le *Government Mining Engineer*, ou *Chief Inspector* (section 6.1.2 du code de pratique SABS 0293);
- Dans toutes les mines où la puissance motrice est supérieure à 2500 kW ou dans lesquelles sont installées des machines d'extraction destinées à transporter des personnes, toutes les machines doivent être sous la supervision d'un ingénieur (article 2.13.1 de la *Government Notice R992*<sup>8</sup>);
- Si la puissance motrice est inférieure à 2500 kW, les machines doivent être sous l'autorité d'une personne responsable qui a de nombreux devoirs mentionnés dans l'article 2.13.4.1<sup>9</sup> (article 2.13.2 de la *Government Notice R992*);
- Un opérateur de treuil doit détenir un certificat délivré par le *Chief Inspector of Mines* ou doit avoir suivi une formation reconnue par la *Mining Qualifications Authority* (chapitre 1, définition 35A<sup>10</sup> de la *Government Notice R992*);

<sup>7</sup> Le Government Notice R992 est le règlement qui contient la majorité des éléments relatifs aux treuils et à leur sécurité.

<sup>8</sup> 2.13.1 *At any mine or works where -*

(a) *the designed rating of machinery used in the generation of power, together with the power supplied from outside sources, exceeds the equivalent of 2 500 kilowatts; or*  
(b) *any winding plant intended for conveying persons is installed, all machinery shall, subject to regulation 2.13.6.1, be under the general charge of an engineer who shall be appointed in writing by the manager.*

<sup>9</sup> 2.13.4.1 *The engineer or competent person appointed in terms of regulation 2.13.2 shall -*

(a) *subject to regulation 2.13.12, be responsible for the safe installation and the proper operation, running and maintenance of all machinery;*  
(b) *be responsible for the safe erection and proper maintenance of all buildings, structures and tanks;*  
(c) *take all reasonable measures to ensure that -*  
(i) *all safety appliances, mechanisms and guards are maintained in good condition;*  
(ii) *the provisions of the regulations relating to machinery are fully complied with;*  
(iii) *the working of any apparatus or machine, the using of which may constitute a danger to any person, is stopped.*

<sup>10</sup> (35A) *"winding-engine driver" means a person who is the holder of a winding-engine driver certificate issued by the Chief Inspector of Mines or who has been assessed competent against a qualification recognised by the Mining Qualifications Authority for this purpose.*

- Le laboratoire qui effectue les tests de rupture des câbles doit être approuvé par le *Chief Inspector of Mines* (article 16.3.1<sup>11</sup> de la *Government Notice R992*);
- Les raisons du remplacement d'un câble ainsi que des données sur son exploitation doivent être transmises au *Principal Inspector of Mines* (article 16.28.2 de la *Government Notice R992*<sup>12</sup>);
- L'inspection des guides, du puits et des portes de chaque niveau doit être faite chaque semaine (article 16.73<sup>13</sup> de la *Government Notice R992*).

Or l'ensemble législatif et réglementaire au Québec n'est pas structuré de la même façon qu'en Afrique du Sud : il n'existe pas de *Chief Inspector of Mines* ou d'équivalent, seule la condition médicale est prise en compte pour les opérateurs de treuils, le laboratoire où sont effectués les tests destructifs des câbles n'est pas approuvé par la CSST, il n'y a pas de personne désignée pour effectuer les examens des câbles ou du puits à l'exception des câbles avec un FS réduit, qui, conformément à la norme SABS 0293, doivent être inspectés par un inspecteur qualifié.

Globalement, nous estimons que l'ensemble des dispositions législatives, réglementaires et normatives qui existe en Afrique du Sud et qui permet d'atteindre le niveau de sécurité actuel n'est pas intégralement retranscrit dans l'ensemble législatif, réglementaire et normatif du Québec, qui encadre la sécurité des treuils miniers. De ce fait, les barrières organisationnelles qui existent en Afrique du Sud ne sont pas forcément présentes au Québec. Or les dérives organisationnelles existent dans toutes les entreprises, qu'elles soient plus<sup>14</sup> ou moins<sup>15</sup> structurées, et peuvent un jour mener à des accidents si elles ne sont pas bloquées dans leur cheminement.

De plus, la question de la relève technique au Québec, en particulier pour l'inspection et l'entretien des machines d'extraction, a été soulevée à plusieurs reprises lors des rencontres entre les auteurs et divers intervenants. Le désengagement progressif de CanMet, la disparition des guides d'adaptation sur le site web de Ressources Naturelles Canada nous semblent être des signes de

---

<sup>11</sup> 16.30.1

(i) "**approved rope testing station**" means a testing station approved by the Chief Inspector of Mines for the destructive testing of ropes used in a winding plant;

<sup>12</sup> 16.28.2 When any winding rope in use is replaced, the reasons for discard, the life in terms of winding cycles, the time in use and such other particulars regarding that winding rope as the Principal Inspector of Mines may require must be submitted to the Principal Inspector of Mines.

<sup>13</sup> 16.73 The manager or subordinate manager and an engineer or competent person appointed in terms of regulation 2.13.2, as the case may be, shall, in respect of his area of responsibility, appoint in writing competent persons whose duty it shall be to examine carefully, to an extent to be clearly defined in their respective letters of appointment, at least once in each week, and at intervals not exceeding 10 days, the guides or rails and the shaft compartments and equipment, including the doors, gates and barriers and ancillary equipment at stations, landing platforms and loading boxes.

<sup>14</sup> Les dysfonctionnements organisationnels font partie des causes des deux catastrophes de la NASA avec les navettes spatiales (Challenger en 1986 et Columbia en 2003) selon Daniellou, F., Simard, M. et Boissières, I. (2010). Facteurs humains et organisationnels de la sécurité industrielle : un état de l'art. Numéro 2010-02 des Cahiers de la Sécurité Industrielle, Fondation pour une Culture de Sécurité Industrielle, Toulouse, France (ISSN 2100-3874).

<sup>15</sup> Les dysfonctionnements organisationnels font partie des causes de la catastrophe de Lac-Mégantic en 2013 selon le BST : Rapport d'enquête ferroviaire R13D0054, Train parti à la dérive et déraillement en voie principale – Train de marchandise MMA-002 de la Montréal, Maine & Atlantic Railway au point militaire 0,23 de la subdivision Sherbrooke Lac-Mégantic (Québec) le 6 juillet 2013.

perte d'expertise technique qui devient de plus en plus visible. Par exemple, deux rapports d'essai de chute libre recueillis lors de cette expertise et signés par des ingénieurs comportent, entre autres, des erreurs dans les angles des dents.

## 3.2 Comportement des câbles, usure et retrait de service

### 3.2.1 Travaux de recherche en Afrique du Sud : comportement et durée de vie des câbles d'extraction

En Afrique du Sud, où les parachutes ont complètement été abandonnés, le législateur sud-africain ayant une approche plus probabiliste alors qu'au Québec l'approche est plus déterministe (Descourrière *et al.*, 2006), tous les efforts se concentrent sur le câble afin d'assurer la sécurité des travailleurs. En effet, un financement important a été apporté à la recherche sur les câbles d'extraction durant plus de vingt ans. Au total, près de 6000 pages de rapports ont été publiées (Van Zyl, 2002). Les principales conclusions et recommandations de ces rapports sont présentées ci-dessous :

- Il n'y a pas de modèle théorique pour l'endommagement des câbles ni de tendance générale. Les essais électromagnétiques sont donc une aide précieuse pour connaître leur état;
- Les oscillations se font selon le premier mode uniquement, les modes supérieurs sont amortis;
- Le module d'élasticité est fonction de la charge;
- Deux modes de dégradation majeurs ont été identifiés pour les câbles à fibres triangulaires : (i) la déformation plastique des fibres externes et (ii) la fatigue (charge et facteur dynamique);
- Le ratio de force dynamique/statique dépend uniquement de la décélération imposée au tambour, pas de la profondeur à laquelle se trouve le transporteur. En utilisation normale, ce ratio a un impact uniquement sur les puits très profonds;
- Les essais *in situ* avec diminution du FS (et donc du diamètre du câble) ont montré qu'il n'y a pas d'usure prématurée du câble, et que le nombre de cycles d'utilisation est équivalent. Cela a conduit à une évolution vers une nouvelle norme pour les câbles, avec introduction des facteurs de sécurité dynamiques (aujourd'hui il y a une obligation de suivi de la tension dans le câble). Les chercheurs ont proposé un FS statique de 5, un FS dynamique de 3 et une diminution de 5 % autorisée si une méthode d'inspection approuvée est utilisée (et tentative de faire baisser le FS statique à 4,5);
- Formation d'un comité pour l'évaluation de l'état du câble (*rope condition assessment*). Des formations professionnelles ont été préparées à destination des inspecteurs de câble (niveaux I et II);
- Mise en œuvre du facteur de sécurité (statique) réduit avec la formule  $25000/(4000+L)$  (en 1988) ainsi qu'une méthode approuvée pour l'exploitation;
- Un rapport d'évaluation des instruments pour les tests électromagnétiques a été remis : il est assez critique sur la capacité à détecter les fils cassés à l'intérieur des câbles et sur l'estimation de la corrosion (particulièrement pour les câbles anti-giratoires). Cependant, les spécimens de câbles utilisés pour les tests étaient déjà largement écartés par d'autres critères de retrait.



Les travaux de recherche menés en Afrique du Sud ont permis de mieux appréhender le comportement des câbles d'extraction. La section suivante présente les mécanismes à l'origine de l'usure et de la rupture des câbles.

### 3.2.2 Causes d'usure et de rupture des câbles

La rupture survient généralement dans les zones les plus sujettes à la fatigue et à l'abrasion (sauf intervention de facteurs externes) (Verreet, 2011). Selon Verreet (2011), la rupture ne survient pas de manière inopinée, et on peut l'anticiper de quelques minutes : on observe souvent des ruptures de fils, à quelques secondes d'intervalle, pendant environ 10 min. Cependant, l'exemple qu'il donne est valable pour les câbles utilisés dans les grues, facilement visibles, ce qui n'est pas nécessairement le cas pour les câbles d'extraction qui plongent dans un puits de mine non éclairé. 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, 200)<sup>16</sup>.

Le processus de dégradation des câbles dépend des conditions d'opération (Slesarev et Vorontsov, 2012). Les principales causes de détérioration des câbles sont (HSE, 2004) :

- 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.

L'**usure** des torons peut parfois conduire à des déplacements de certains fils [Figure 5]. Ces déplacements exposent plus particulièrement certains fils et favorisent leur rupture (HSE, 2004). Les câbles avec des fils externes plus gros seront plus résistants à l'abrasion, mais moins résistants à la fatigue (Klein, 2010). La déformation plastique des torons peut se produire sur le tambour du treuil et il faut vérifier les pressions radiales lors de la sélection d'un câble (Rebel *et al.*, 2011).



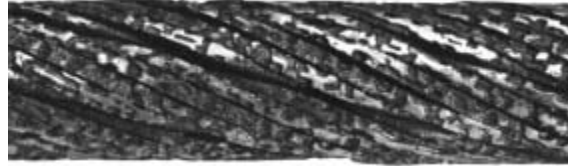
**Figure 5. Fil déplacé à cause de l'usure.**

De « Guidance on the selection, installation, maintenance and use of steel wire ropes in vertical mine shafts », par Deep Mined Coal Industry Advisory Committee, 2004, p. 83 (<https://www.hse.gov.uk/pubns/micvertical.pdf>).  
©HSE,2004. Reproduit avec permission.

La corrosion va souvent de pair avec l'usure : elle accélère le processus d'usure par abrasion en éliminant de l'acier, tout comme l'usure par abrasion favorise la corrosion en éliminant la couche de zinc (galvanisation). Si la corrosion est localisée sur une courte section du câble, cela peut être le signe d'une fuite ou de condensation se formant à un endroit précis lorsque le câble est statique (HSE, 2004). Lorsque la corrosion est également présente sur les côtés des fils, cela

<sup>16</sup> L'article de Weischedel n'est pas daté, néanmoins les références citées dans cet article suggèrent qu'il a été rédigé après 2000. La même notation a été utilisée pour les autres références dans le même cas.

peut-être le signe d'une corrosion interne [Figure 6]. La corrosion interne est souvent très dangereuse et difficile à détecter (HSE, 2004; Verreet, 2011).



**Figure 6. Câble présentant une corrosion externe avancée et probablement de la corrosion interne.**

De « Guidance on the selection, installation, maintenance and use of steel wire ropes in vertical mine shafts », par Deep Mined Coal Industry Advisory Committee, 2004, p. 84 (<https://www.hse.gov.uk/pubns/micvertical.pdf>). ©HSE,2004. Reproduit avec permission.

La fatigue représente la détérioration du câble sous l'effet de chargements répétés (Miscoe et McKewan, 1993). On peut classer la fatigue selon quatre phénomènes : tension-tension, courbure sur les molettes, courbure libre et torsion (Chaplin, 2008). La fatigue observée in situ est souvent due à la conjonction de plusieurs des phénomènes mentionnés (Chaplin, 2008), mais la fatigue de courbure est souvent la première cause de dégradation des câbles d'extraction (Weischedel, 200). La fluctuation du chargement accentue le phénomène de fatigue (Chaplin, 2008). À 50 % de la charge maximale, la rupture par fatigue surviendra après un grand nombre de cycles. À 25 % de la charge maximale à la rupture, il est très peu probable que la rupture soit causée par la fatigue. Ainsi, avec des coefficients de sécurité élevés ( $FS > 4,0$ , souvent  $FS > 5,0$ ), il paraît peu probable que la principale cause de rupture des câbles d'extraction soit la fatigue. Un câble se détériorant par fatigue ne va pas présenter de signes externes avant d'avoir atteint 90 % des cycles nécessaires à sa rupture. Les premiers signes qui vont apparaître sont de fines fissures, qui auront peu de chance d'être repérées à l'inspection visuelle à moins qu'on ne les cherche spécifiquement (HSE, 2004). Le rôle principal du cœur est de maintenir les torons externes en place, et la capacité du cœur à jouer son rôle affecte la résistance à la fatigue du câble (Klein, 2010). Par ailleurs, 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. Enfin, pour les puits très profonds, la différence de tension dans le câble entre le fond du puits et la molette va engendrer un différentiel dans le couple de torsion augmentant la fatigue du câble (Verreet, 2011).

La loi de Palmgren-Miner permet d'estimer la fatigue cumulative, due à plusieurs phénomènes conjoints (Chaplin et Potts, 1991) :

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = C \quad (3.1)$$

$$0.7 \leq C \leq 2.2 \quad (3.2)$$

Avec  $N_i$  la durée de vie en fatigue pour une contrainte  $\sigma_i$ , et  $n_i$  le nombre réel de cycles subits à cette amplitude. La constante C devrait être de 1 lors de la rupture. Cependant il a été observé que C variait suivant le type de fatigue [Eq. 3.2]. Pour la conception, les plus conservateurs choisissent  $C = 0,3$ .

Les études expérimentales de Chaplin (1991) montrent que :

- Pour la fatigue due à la flexion sur la molette, la moyenne est  $C = 0,998$ , avec un écart-type de 0,199;
- Pour la tension pure (tension-tension), la moyenne est  $C = 1,4$ . La valeur  $C > 1$  s'explique par le fait que l'usure de contact va survenir en différents points du câble, et donc le nombre de cycles total auquel va résister le câble au complet est plus grand que celui d'une section donnée.

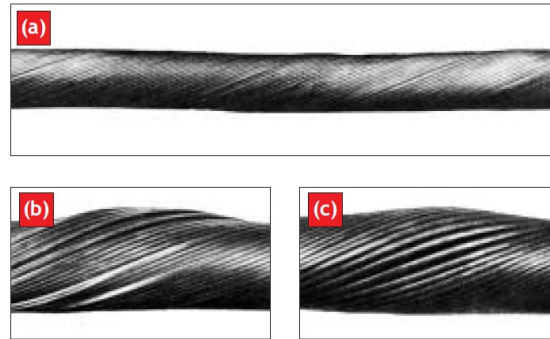
Pour pouvoir utiliser la loi de Palmgren-Miner, il faut s'assurer que chaque composante de la fatigue s'applique à une partie identique du câble, et que les différents processus de fatigue sont indépendants (Chaplin, 2008; Chaplin et Potts, 1991).

Les types de fatigue sont listés ci-dessous, et sont souvent combinés les uns aux autres en utilisation réelle (Chaplin, 2008) :

- Tension pure (tension-tension), due à la fluctuation de la charge axiale du câble. Des charges importantes vont engendrer une charge plus uniforme, et en conséquence augmenter la durée de vie en fatigue du câble;
- Flexion sur la molette (flexion répétée à tension constante), due au changement de courbure des fils lors du passage du câble sur la molette. Le manque de mobilité inter fils va aggraver le phénomène. Parmi les paramètres à surveiller : le ratio  $D/d$  (diamètre de la molette  $D$  sur diamètre du câble  $d$ ), la tension, l'angle de déflexion, la géométrie de la gorge, la lubrification. La durée de vie des câbles est significativement plus faible sur les tambours à enroulement multicouches comparativement à une molette de diamètre équivalent (treuil à friction);
- Flexion libre, due à des charges dynamiques;
- Torsion, due à un couple lorsque l'on charge le câble.

La **fragilisation de la surface** peut être due à une déformation plastique ou à un frottement créant de la martensite en surface du câble (réorganisation du réseau cristallin avec un faible déplacement des atomes de fer). La martensite est habituellement créée lors de la trempe de l'acier : il perd alors sa ductilité et devient fragile. Les fissures dans la martensite du câble (environ 0,02 mm de profondeur) favorisent à la longue l'apparition des fissures de fatigue (HSE, 2004).

Les **dommages accidentels et la distorsion** ne sont pas des détériorations usuelles, mais ils doivent absolument être repérés rapidement lors de l'inspection, car ces types de défauts peuvent conduire à une fatigue prématurée. Parmi les déformations permanentes à surveiller, il y a les déformations en panier (ou nid d'oiseau) et les distorsions [Figure 7]. Les distorsions sont plus courantes pour les câbles clos, mais peuvent apparaître également pour les câbles à torons. Par ailleurs, Verreet (2011) indique que les torsions dans les câbles antigiratoires (clos, semi-clos et multi-torons) vont engendrer une redistribution des efforts des fils externes vers l'intérieur du câble.



**Figure 7. Déformation en panier (a) et distorsions (b et c).**

De « Guidance on the selection, installation, maintenance and use of steel wire ropes in vertical mine shafts », par Deep Mined Coal Industry Advisory Committee, 2004, p. 92 (<https://www.hse.gov.uk/pubns/micvertical.pdf>).  
©HSE,2004. Reproduit avec permission.

Les câbles devraient être retirés du service lorsque les fils externes ont perdu 33 % de leur épaisseur, ou que certains fils sont déplacés, ou que des déformations sont notées dans le câble, ou après une surcharge, ou si des doutes sont soulevés lors d'un essai non destructif (HSE, 2004).

Parmi les problèmes augmentant l'usure des câbles on peut citer les angles de déflexions trop importants (en général on conserve ces angles en deçà de  $1,5^\circ$ ) et l'angle d'ouverture de la molette qui n'est pas adapté au diamètre du câble (Verreet, 2011).

Enfin, dans le cas d'un freinage d'urgence lors de la montée de la cage, on peut parfois observer un mou de câble ainsi que la formation d'un nœud, et si les parachutes ne s'engagent pas la redescende de la cage dans le puits va potentiellement amener le câble à la rupture (Verreet, 2011).

Pour les câbles multi-torons, couramment utilisés pour l'extraction minière, les fils cassés se trouvent souvent à l'intérieur, et sont donc non repérables par une simple inspection visuelle. La rupture due à la fatigue survient souvent à partir de l'intérieur pour les câbles multi-torons, il faut donc les surveiller attentivement à l'aide d'inspections électromagnétiques (Weischedel, 2005). Par contre, ces dispositifs ne font qu'indiquer la position de fils cassés sans les quantifier.

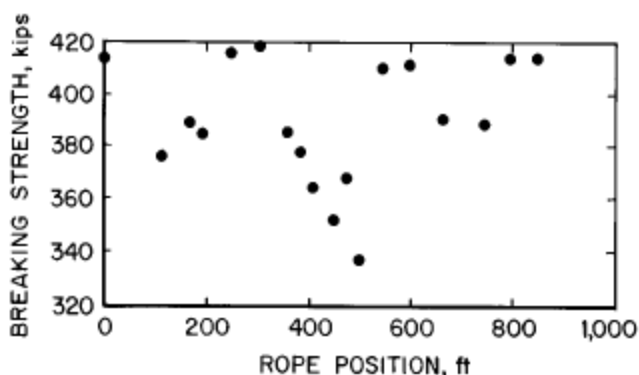
## Résistance à la rupture

Le rapport de Young (1947) présente les résultats d'essais de rupture de 44 câbles, et pour chacun de ces câbles la position du point faible a été identifiée. Il ne s'agit jamais de la partie connectée à la cage (attache). Le rapport distingue trois sections du câble lorsque le skip (ou la cage) est au point le plus bas dans le puits :

- Section (a) : partie qui est encore enroulée sur le tambour;
- Section (b) : partie entre le tambour et la molette;
- Section (c) : partie entre la molette et la cage (ou le skip).

La section (a) est exposée à des contraintes d'écrasement et de flexion. Seulement 2 des 44 câbles testés avaient leur point le plus faible dans cette section. La section (b) subit une tension très importante, ainsi que des contraintes de flexion et d'écrasement au tambour. Elle est par contre protégée de l'usure (elle ne passe pas sur la molette) et des charges dynamiques (amorties par la molette). Aucun des 44 câbles testés n'avait le point le plus faible dans cette section. Enfin, la section (c) est la partie la plus sollicitée du câble : tension, flexion et écrasement à la molette, charges dynamiques, fatigue, corrosion et usure. Le point le plus faible du câble (42 des 44 câbles) peut se trouver à n'importe quelle distance de l'attache de la cage.

Comme le montre la figure 8, la résistance à la rupture n'est pas uniforme en tous points d'un câble usagé. Par ailleurs, on peut remarquer qu'aux deux extrémités du câble, là où sont généralement pratiqués les tests de rupture (pour des raisons pratiques), la résistance à la rupture est élevée, ce qui n'est pas nécessairement représentatif de la résistance réelle du câble (Miscoe et McKewan, 1993). En effet, la partie attachée à la cage ne passe jamais sur la molette et n'est donc pas sujette à la fatigue en flexion. Par ailleurs, 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. Enfin, la diminution du diamètre ne représente pas la perte de résistance due à la fragilisation de la surface (Miscoe et McKewan, 1993).



**Figure 8. Résistance à la rupture en fonction de la position sur le câble.**

De « Wire rope research: Analysis of bending fatigue in a 2-inch IWRC wire rope », par A. J. Miscoe et W. M. McKewan (Rapport n° RI-9466), 1993, p. 10 (<https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/ri9466.pdf>).  
©CDC, 1993. Reproduit avec permission.

D'une manière générale, moins il y a de fils, plus le câble est résistant à l'usure et à la corrosion. Par contre, plus il y a de fils, plus le câble est souple (HSE, 2004). 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).

Ainsi, bien que les essais de rupture soient faits à l'attache, il ne faut pas oublier que ce n'est généralement pas le point le plus faible du câble, et que la résistance mesurée à ce point-là n'est probablement pas représentative de la résistance réelle du câble.

### 3.2.3 Critères de retrait des câbles

Une fois que les mécanismes d'usure et de rupture des câbles sont connus et compris, il faut se poser la question du moment opportun du retrait de service des câbles : assez tôt pour prévenir tout risque de rupture, mais pas trop tôt pour éviter des surcoûts inutiles. Il existe de nombreux critères de retrait des câbles, tant au niveau des législations que des normes.

Au **Canada**, les critères de retrait des câbles sont multiples, mais relativement similaires d'une province à l'autre. Il faut noter que deux provinces/territoires ne donnent pas de critères de retraits des câbles : le Yukon et Terre-Neuve et Labrador. 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 deux ans, ou validation du Chief Inspector (R-NT, 2004; R-SK, 2003);
- Corrosion marquée (3/11);
- Défaut mettant en jeu la sécurité (3/11).

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 2000';
- Corrosion marquée;
- Six torons de cassés sur un pas de câble;
- Critères de perte de section/usure.

En Australie, 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, 2011) :

- Fils cassés : critères différents selon que les fils cassés soient répartis uniformément ou non, sur le câble ou sur le même toron, à proximité des extrémités du câble;
- Perte de diamètre de 6 %;
- Perte de section de 10 %;
- Présence de distorsion (sans plus de précisions);

- Corrosion, exposition à la chaleur;
- Perte de résistance de 10 %;
- Élongation <60 % (comme au Canada).

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 un 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.

La **norme SABS0293** définit des critères de retraits spécifiques à chaque type de câble (CSST, 2003a). Par ailleurs, certains critères diffèrent des critères habituels :

- Fils brisés : critères plus précis que le 5 % dans un pas de toron habituel;
- Corrosion : perte de 10 % en résistance (basé sur LMA), comparaison photos (piqûre);
- Limites d'usure (perte de section) par abrasion ou déformation plastique;
- Limites de déformations (ondulation, flexions, coques, kinks);
- Rupture de l'âme textile du câble;
- Changements de longueur de pas;
- Propriétés mécaniques : perte de résistance de 10 % (classique), élongation : tension plastique < 0,5 %;
- Effets cumulatifs (différent de la norme ISO 4309).

La prise en compte des effets cumulatifs se fait avec l'équation (3.3), et on retire le câble du service si le paramètre CR > 1 :

$$CR = \frac{R_w}{R_{pw}} + \frac{R_d}{R_{pd}} \quad (3.3)$$

Où

- $R_w$  est la réduction réelle de la section métallique due aux fils brisés, exprimée en termes de pourcentage de la section métallique du câble;
- $R_{pw}$  est la réduction permise de la section d'acier due aux fils brisés, exprimée en termes de pourcentage de la section métallique du câble;
- $R_d$  est la réduction réelle du diamètre due à l'usure et aux déformations plastiques, exprimée en termes de pourcentage de la section nominale du câble; et
- $R_{pd}$  est la réduction permise du diamètre, due à l'usure et aux déformations plastiques, exprimée en termes de pourcentage de la section nominale du câble.

Les effets cumulatifs selon la norme SABS0293 ne considèrent pas la corrosion externe, contrairement à la norme ISO 4309. Néanmoins, sur le principe, les deux méthodes sont similaires.

### 3.3 Évaluer la résistance des câbles par des essais ou examens non destructifs afin d'éviter d'arriver à la rupture

La section précédente a présenté les causes d'usure des câbles et les critères de retrait qui ont été mis en place afin d'éviter la rupture des câbles. La question de la mesure de ces différents critères se pose. Les mesures ou vérifications peuvent être faites lors d'examens visuels ou essais électromagnétiques ponctuels, mais également à l'aide d'un système de suivi continu de l'état du câble.

#### 3.3.1 Examens visuels

Une lampe de casque de sécurité (ou une lampe de poche) n'est pas suffisante pour certains examens visuels (R-NSW, 2011). À notre connaissance<sup>17</sup> et suite à nos visites, il ressort que certains examens visuels quotidiens de câbles d'extraction sont faits dans des conditions défavorables : vitesse de défilement trop grande<sup>18</sup>, position d'observation peu ergonomique<sup>19</sup>, mauvais éclairage ambiant voire parfois pas d'éclairage autre que la lampe du casque de sécurité.

Selon le guide du New South Wales, les zones à examiner attentivement lors d'un examen visuel sont les (R-NSW, 2011) :

- Zones non passées aux essais non destructifs (*Non Destructive Testing*, NDT);
- Zones avec des anomalies (y compris celles détectées par les NDT);
- Zones à proximité des points d'ancrage et d'attache;
- Zones où le câble repose sur la molette;
- Zones sujettes à la corrosion;
- Zones où le câble change de couche sur le tambour.

Le rapport d'examen visuel devrait inclure : la date, un relevé détaillé des fils cassés (position, nombre par pas de câble, nombre total sur le câble, détails à proximité des extrémités), l'état d'usure du câble (position, perte de diamètre), la corrosion, les changements de diamètre du câble, la distorsion, observations diverses (changements de la structure du câble...) (R-NSW, 2011). Il ne faut pas oublier aussi d'examiner visuellement la partie du câble qui reste tout le temps sur le tambour pour y relever les défauts potentiels. Manifestement, selon les informations recueillies, ce dernier examen n'est pas toujours réalisé.

---

<sup>17</sup> Lors de nos entretiens téléphoniques, un répondant a indiqué que l'inspection du câble commençait par une inspection visuelle de l'attache puis était suivie par l'inspection câble de la recette via la porte (avec un éclairage suffisant) à vitesse réduite sur la portion qui sera utilisée (le puits n'étant pas accessible sur toute sa profondeur). Un autre répondant a signalé que l'inspection du câble était faite à la salle du treuil. Enfin, le dernier répondant a signalé que l'inspection visuelle quotidienne était effectuée ans le chevalement. Dans ce dernier cas, l'attache du câble sur le transporteur est également vérifiée tous les jours.

<sup>18</sup> Le temps de réaction humain à un stimulus visuel est de l'ordre de 0,5 seconde. Il serait donc opportun que la zone d'observation du câble soit éclairée pendant plus de 1 seconde en tenant compte de la vitesse de défilement afin de pouvoir observer une seconde fois un défaut qui est détecté.

<sup>19</sup> Nous avons observé un examen visuel du câble réalisé au travers d'une ouverture carrée de moins de 20 cm de côté avec comme seul éclairage une lampe de casque de sécurité avec une distance observateur/câble d'environ 3 mètres.



### 3.3.2 Essais électromagnétiques

Les essais non destructifs (NDT) font partie du suivi régulier des câbles d'extraction, cependant certains types de câbles (clos et semi-clos notamment) demandent un matériel particulier (HSE, 2004). L'objectif de ce type d'essais est d'identifier les zones avec des fils brisés et/ou de la corrosion. Par contre, si la corrosion est très importante, ce type d'instrument ne sera peut-être pas en mesure de détecter les bris de fils internes.

Les essais non destructifs électromagnétiques peuvent parfois être utilisés pour estimer la durée de vie restante des câbles, cependant il faut interpréter les résultats avec précaution, car deux câbles présentant les mêmes défauts auront des durées de vies différentes en fonction des conditions d'utilisation (Slesarev et Vorontsov, 2012). Les données d'un test électromagnétique permettent d'identifier une perte de section (*Loss of metallic area*, LMA, due à la corrosion ou l'abrasion) et des défauts localisés (*Localized fault*, LF, dus à des fils cassés) (Canova *et al.*, 2009 ; Canova *et al.*, 2010). À partir de ces informations, il est possible d'estimer la charge admissible du câble.

Selon le guide du New South Wales, les équipements pour les essais non destructifs devraient répondre aux exigences suivantes (R-NSW, 2011) :

- Fonctionner dans les deux directions;
- Être suffisamment sensibles pour détecter un changement de 0,5 % dans la section métallique;
- Disposer d'une amplitude du signal qui augmente significativement par rapport au bruit lors du passage sur une anomalie.

Idéalement, il faudrait pouvoir vérifier toute la longueur du câble. Concrètement, pour les treuils à tambour, il faudrait tester le câble de l'attache jusqu'au point de contact du câble avec le tambour lorsque la cage est au point le plus bas. À une fréquence plus faible que les tests réglementaires, il serait bon de tester la partie du câble qui reste enroulée sur le tambour pour vérifier la corrosion et la détérioration des points de changement de couche (R-NSW, 2011).

#### Les instruments

Le U.S. Bureau of Mines a analysé les différents outils de test électromagnétique sur le marché afin de préparer une norme d'essai pour ces appareils (Anderson *et al.*, 1994). La norme ASTM E1571 répertorie les types d'instruments et encadre les essais électromagnétiques sur les câbles métalliques (ASTM E1571, 2011) :

1. Instrument à courant alternatif : on mesure une variation du courant. Ce type d'appareil fonctionne à faible voltage et il faut donc démagnétiser le câble au préalable. Ce type d'appareil détecte les changements dans la section du câble (LMA);
2. Instruments à courant continu et aimant permanent : on mesure le courant de sortie, qui est proportionnel au volume d'acier, et donc à la section d'acier (LMA);
3. Instrument à fuite de champ magnétique : lorsqu'un fil est cassé, il va y avoir une fuite dans le champ magnétique que l'on peut détecter (LF).

Généralement, l'information est plus qualitative que quantitative (LF), mais permet de concentrer les efforts d'une inspection visuelle sur une zone particulière du câble (ASTM E1571, 2011). Un seul appareil de mesure peut inclure plusieurs instruments.

L'étude comparative menée par Anderson *et al.* (Anderson *et al.*, 1994) montre que pour la détection des LF :

- La vitesse du câble influence peu le résultat;
- Le diamètre du câble à peu d'influence pour un défaut donné;
- L'ouverture de la tête de lecture devrait être le plus proche possible du diamètre du câble;
- Plus les fils cassés ont un gros diamètre, plus ils sont faciles à détecter;
- L'influence de la forme de l'extrémité d'un fil cassé est négligeable.

La même étude comparative montre que pour la détection de la LMA :

- La vitesse du câble influence peu le résultat;
- La localisation de l'anomalie (interne ou externe) influence peu le résultat;
- La précision diminue lorsque le diamètre du câble augmente;
- Lorsque le câble est en tension, on peut observer une diminution de la section, même s'il n'y a pas de perte de métal, probablement à cause de l'élongation du câble.

Des précautions doivent être prises lors de l'utilisation de ces instruments : démagnétisation plus ou moins poussée du câble, stabilité de la vitesse de défilement, choix du point de référence pour le calcul de la perte de section, etc. Malgré toutes ces précautions, des incertitudes influençant les résultats demeurent et l'interprétation de ces derniers peut varier d'un inspecteur à l'autre, et l'expérience de l'opérateur est très importante (Anderson *et al.*, 1994). Enfin, la réponse des appareils de NDT peut être significativement différente selon qu'il s'agisse d'un défaut « artificiel » (créé volontairement pour les besoins de l'étude comparative) ou dû à la dégradation du câble *in situ* (ASTM E1571, 2011).

### Les limites des tests non destructifs

Parmi les limitations des NDT, on peut retenir que (R-NSW, 2011) :

- Il est difficile (voire impossible) de détecter des défauts proches des extrémités;
- Il est impossible de détecter les changements dans la nature métallurgique du câble (ASTM E1571, 2011);
- La sensibilité décroît avec la profondeur du défaut (ASTM E1571, 2011);
- Les fils cassés internes ne sont pas toujours détectés;
- Les fils cassés avec un très petit espace sont difficilement détectables (ASTM E1571, 2011);
- La LMA sert plutôt à identifier les changements le long du câble qu'à comparer avec le câble neuf;
- Les capacités de détection des appareils sont limitées pour les câbles clos;
- La proximité avec certains équipements peut générer des nuisances (structure métallique proche, radio, autres câbles, lignes de courant...);
- Le LMA % n'indique pas la perte de résistance en % (varie beaucoup d'un câble à l'autre, on ne peut pas se fier uniquement là-dessus);
- L'expérience du technicien joue ainsi que le type et la taille des défauts dans le câble.

### 3.3.3 Suivi en continu des câbles d'extraction

Le suivi en continu des câbles peut être fait à l'aide de tests non destructifs. Au moins deux principes différents, optique ou magnétique [Tableau 2], permettent de suivre en continu l'état des câbles d'extraction.

**Tableau 2. Systèmes de suivi en continu des câbles d'extraction**

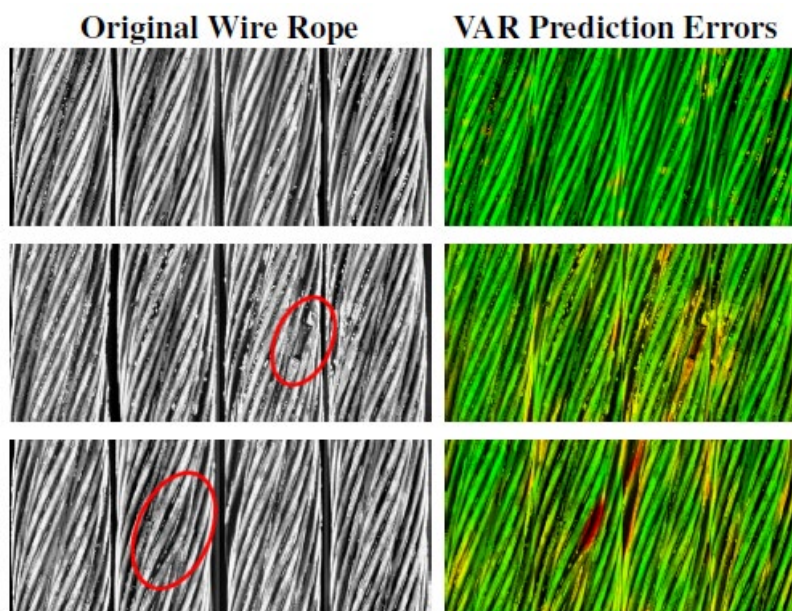
	<b>Systèmes optiques</b>	<b>Systèmes électromagnétiques</b>
Avantages	Fonctionne à la vitesse nominale du câble Photos disponibles	Fonctionne à la vitesse nominale du câble Enregistrements disponibles Détection des défauts internes et externes
Inconvénients	Détection des défauts externes seulement Détection limitée par la présence de graisse ou de saletés sur le câble	Une analyse visuelle ou un test non destructif plus précis est nécessaire pour confirmer un défaut important Masquage possible de défauts par d'autres

Les câbles d'extraction se détériorent au cours du temps, en partie à cause de l'usure due à une utilisation répétitive, à cause des eaux corrosives présentes dans certaines mines, ou encore à cause de chute d'objets dans le puits (Udd, 2004). Le règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines (RSSM) (R-QC, 2014) impose un facteur de sécurité (FS) de 5.0 à la molette. Ce FS, basé sur l'expérience, et tenant compte de l'usure du câble dans l'utilisation future, peut être difficile à atteindre pour les puits de très grande profondeur (Udd, 2004). Ainsi, il peut être pertinent d'utiliser l'article 288.1 du RSSM, qui permet de réduire le FS à  $25,000/(4,000+L)$ , pourvu que les normes sud-africaines SABS0294:2000 et SABS0293:1996 soient respectées, et qu'un « dispositif de supervision de l'état du câble en continu » soit utilisé. Outre l'abaissement du FS, ces systèmes permettent également de répondre aux exigences d'inspection journalière et mensuelle des câbles d'extraction.

Un système optique utilise plusieurs caméras qui scrutent le (ou les) câble d'extraction à 360°. En ce sens il se rapproche de l'inspection visuelle classique obligatoire 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 est précise et peut être suivie d'un jour à l'autre, des photos de chaque défaut sont prises et sauvegardées, le système inclut une installation lumineuse garantissant une bonne visibilité sur les câbles. Par contre, ce système présente les mêmes défauts qu'une inspection visuelle, à savoir l'impossibilité de juger de l'état interne du câble (D.Haase *et al.*, 2010). Pour cette raison les tests destructifs restent indispensables (Udd, 2004).

Un système d'inspection continue optique 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). Les résultats de ce type de système sont illustrés à la figure 9. Le système fonctionne en comparant les images des quatre caméras simultanément : du fait de la régularité du câble, les quatre images devraient être identiques en l'absence de défaut (zones vertes). Si des différences sont identifiées, elles seront repérées en rouge : plus l'écart entre les différentes images est important, plus la couleur orange/rouge est intense. Une fois les zones

avec des défauts identifiés, une inspection visuelle précise devrait être envisagée. Cette méthode présente l'avantage de diminuer grandement les faux positifs (D.Haase *et al.*, 2010). La méthode proposée par Platzer *et al.* (2009) a permis d'identifier 90 % des zones endommagées sur le câble de test, avec un taux de faux positifs inférieur à 10 %.



**Figure 9. Identification automatique des défauts sur les câbles à l'aide d'un système à caméra.**

De « Analysis of structural dependencies for the automatic visual inspection of wire ropes », par D. Haase, E.-S. Wacker, E. G. Schukat-Talamazzini et J. Denzler, 2010, *Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Workshop on Vision, Modelling and Visualization*, p. 49 (<https://diglib.org/xmlui/bitstream/handle/10.2312/PE.VMV.VMV10.049-056/049-056.pdf>). ©The Eurographics Association, 2010. Reproduit avec permission.

Les systèmes électromagnétiques sont très similaires à ceux utilisés pour les tests réglementaires ponctuels. La principale différence est que les systèmes décrits dans cette section font de l'enregistrement continu à vitesse nominale et sont généralement munis d'alarmes ou de sécurités pour arrêter l'exploitation en cas de détection de problème grave. Ces systèmes sont pour l'instant peu utilisés au Québec. Deux mines au Québec sont équipées d'un système de suivi en continu de l'état du câble. Les informations suivantes ont été recueillies lors de la visite de l'une des mine en avril 2014 [Figure 10] :

- Le SSDC (Système de Surveillance Du Câble) est au sommet du chevalement, juste sous la molette (à environ 200 pieds de hauteur);
- Le SSDC enregistre en continu (exemple donné d'une alarme en pleine nuit => arrêt de la production, visite d'un inspecteur de câble externe le lendemain);
- Un enregistrement est imprimé chaque jour et conservé, puis présenté à l'inspecteur de câble externe lors des inspections régulières.

Les systèmes de suivi électromagnétiques se rapprochent plus des essais électromagnétiques prescrits par les réglementations provinciales que les systèmes optiques. Les systèmes précédents sont relativement similaires, et seule une analyse comparative sur un câble test permettrait de déterminer si l'un est meilleur que l'autre. Il faut cependant noter qu'un fournisseur

produit aussi des systèmes de mesure électromagnétiques utilisés pour les inspections bisannuelles.



**Figure 10. Photo d'un système de suivi en continu du câble.**

### **Système de suivi #1**

À l'origine, ce système a été développé par CanMet et il a par la suite été optimisé par une entreprise au Québec. Il est équipé de plusieurs capteurs :

- Deux capteurs différents pour identifier les défauts ponctuels ou *Localized Fault* (LF);
- Un capteur à effet Hall pour mesurer la perte de section ou *Loss of Metallic Area* (LMA);
- Un capteur pour mesurer l'étirement du câble.

Les enregistrements ont été comparés à ce qu'il est possible d'obtenir lors d'une inspection électromagnétique traditionnelle et une bonne similarité a été observée. Il est possible d'équiper le système d'une alarme automatique si un problème est détecté. Cependant cette option reste au choix du client, et n'est pas développée par le fournisseur. Ce dernier fournit uniquement à son client des données brutes qui seront ensuite traitées ou analysées.

L'information entre le capteur et l'enregistreur transite par plusieurs liaisons de nature différente :

- Connexion système de suivi – PLC = fil / fibre optique;
- Connexion PLC – serveur = Ethernet ou fibre optique;
- Connexion serveur – pc = Ethernet.

### 3.4 Maximiser la sécurité des câbles

Trois voies sont à privilégier pour maximiser la sécurité et la durabilité des câbles d'extraction : l'entretien régulier des câbles et leur lubrification, le contrôle du freinage afin de limiter les charges dynamiques et le passage à des technologies de câbles plus durables.

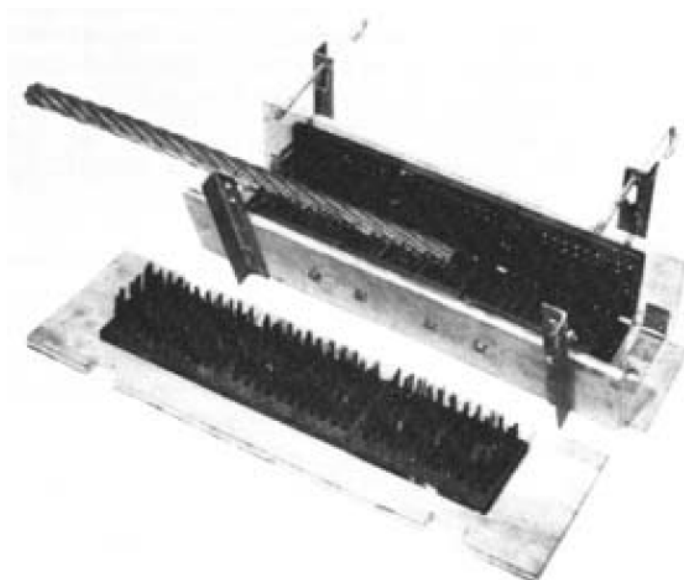
#### 3.4.1 Entretien des câbles et lubrification

L'entretien régulier (lubrification) des câbles est essentiel afin de maximiser leur durée de vie et leur sécurité. La lubrification interne permet de limiter la friction des fils les uns sur les autres, tout en les protégeant contre la corrosion (HSE, 2004). La lubrification peut prendre plusieurs formes (Babendererde et Pusch, 2007). Le lubrifiant devrait être à base d'une huile minérale, car les huiles d'origine végétale et animale ont tendance à se décomposer en acide (HSE, 2004). Les lubrifiants externes permettent de limiter l'abrasion, mais ils ne peuvent être appliqués en grande quantité pour les treuils à friction.

Les lubrifiants devraient avoir les propriétés suivantes (Babendererde et Pusch, 2007; HSE, 2004) :

- Résistance à l'abrasion tout en étant suffisamment plastiques pour résister à la flexion;
- Bonne adhérence pour ne pas glisser le long du câble (par gravité);
- Non corrosifs et stables pour les conditions environnementales de la mine;
- Bonne protection contre la corrosion;
- Pas de détérioration en vieillissant;
- Bonne pénétration pour rentrer dans le câble, et compatibles avec le lubrifiant initial du manufacturier;
- Ne se solidifient pas, permettent ainsi à d'autres lubrifiants de rentrer et à l'eau de sortir;
- Résistants à l'écrasement à la molette.

Idéalement le câble devrait toujours être propre et bien lubrifié. Par ailleurs, il serait bon de le nettoyer avant chaque nouvelle application de lubrifiant (HSE, 2004). Une méthode simple de nettoyage des câbles est d'utiliser une brosse métallique [Figure 11]. Le nettoyage des câbles est essentiel pour prolonger leur durée de vie (Babendererde et Pusch, 2007). Au lieu d'utiliser une simple brosse, un nettoyage plus complet peut être effectué à partir de glace carbonique (CO<sub>2</sub> sous forme solide). Ce procédé est généralement utilisé une ou deux fois par an (Babendererde et Pusch, 2007). Le nettoyage régulier des câbles peut aussi être fait avec de l'air comprimé.



**Figure 11. Brosse métallique pour le nettoyage des câbles.**

De « Guidance on the selection, installation, maintenance and use of steel wire ropes in vertical mine shafts », par Deep Mined Coal Industry Advisory Committee, 2004, p. 78 (<https://www.hse.gov.uk/pubns/micvertical.pdf>).  
©HSE,2004. Reproduit avec permission.

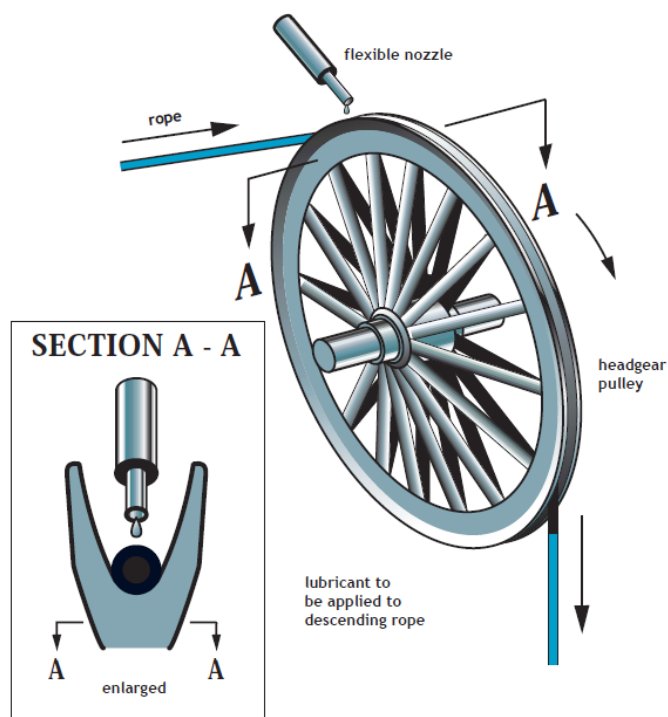
L'application en couche mince (Babendererde et Pusch, 2007) permet :

- de garder le câble propre;
- d'éviter d'emprisonner de l'eau entre le lubrifiant et les fils;
- d'identifier facilement les fils cassés;
- de diminuer la corrosion de contact;
- de protéger les tambours et molettes contre l'usure.

Les lubrifiants utilisés lors de la fabrication du câble sont majoritairement à base de pétrole ou de matériaux bitumineux (HSE, 2004). Ils incluent des adjuvants anticorrosion, anti-oxydation, hydrofuges, etc. Un fournisseur de câbles d'acier a indiqué qu'il avait son propre dispositif d'essai pour les lubrifiants de câble, dispositif remplaçant l'essai « 4 billes » standardisé<sup>20</sup> (ASTM D4172:2010, 2010) utilisé dans l'automobile.

Pour les treuils à tambour dont les puits sont humides, les câbles devraient être lubrifiés une fois par semaine (HSE, 2004). La lubrification automatique est envisageable et peut se faire à l'aide d'un tuyau flexible, soit dans la salle des machines, soit juste au-dessus de la molette (pour les treuils à tambour) [Figure 12]. La quantité de lubrifiant est ajustée par expérience. Les lubrificateurs automatiques appliquent le lubrifiant de manière plus uniforme que manuellement. En général, il faut procéder à une lubrification tous les 100-200 cycles, et pour un câble de 1000 m et 45 mm de diamètre, il faut compter environ 25 L de lubrifiant pour 5000 cycles (Babendererde et Pusch, 2007). On préférera la lubrification manuelle pour les câbles statiques (guides) ou les câbles de treuils faisant moins de 100 cycles par jour.

<sup>20</sup> L'efficacité des caractéristiques anti-usure et de la capacité de charge du lubrifiant sont évaluées à l'aide de machines d'usure et de frottement de laboratoire, notamment l'essai « 4 billes ».



**Figure 12. Lubrification automatique du câble.**

De « Guidance on the selection, installation, maintenance and use of steel wire ropes in vertical mine shafts », par Deep Mined Coal Industry Advisory Committee, 2004, p. 77 (<https://www.hse.gov.uk/pubns/micvertical.pdf>). ©HSE,2004. Reproduit avec permission.

La lubrification automatique peut aussi se faire avec des buses, et dans ce cas l'application se fait juste sous la molette (Babendererde et Pusch, 2007). L'utilisation de Programmable Logic controller (PLC) permet une lubrification automatique avec une quantité prédéterminée de lubrifiant après un nombre de cycles prédéfini. Avec ce type de système, il faut néanmoins prévoir une lubrification manuelle des parties du câble qui ne passent pas sur la molette.

Enfin, la lubrification sous pression permet de faire pénétrer le lubrifiant à l'intérieur du câble, afin de remplacer le lubrifiant du manufacturier après quelque temps. C'est par l'expérience que l'on détermine le meilleur moment pour avoir recours à une telle méthode de lubrification. Les fabricants indiqueront quelle est la méthode d'injection sous pression la plus appropriée, ainsi que les compatibilités avec les lubrifiants utilisés lors de la fabrication des câbles. Par exemple, un fabricant présent au Québec indique à ses clients le lubrifiant utilisé en usine.

### 3.4.2 Limitation des charges dynamiques

Afin d'abaisser le FS du câble, il faut s'assurer que la somme des charges statiques et dynamiques, particulièrement durant les phases d'accélération ou de freinage, reste dans les limites acceptables. Pour arriver à ce résultat, outre le suivi continu de la tension dans le câble, il faut prévoir un système permettant de contrôler le freinage (Sparg, 1995). Plusieurs causes, outre l'accélération au démarrage et au freinage, peuvent être à l'origine des charges dynamiques dans les câbles (Beus et al., 1997; Beus et McCoy, 1995; Beus et Ruest, 2002) :



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

Le contrôle du freinage se fait généralement au niveau du tambour, cependant, en limitant le freinage moyen à 2,5 m/s<sup>2</sup> au tambour, on peut s'attendre à des accélérations d'environ 5 m/s<sup>2</sup> au niveau de la cage (Beus et Ruest, 2002). Il est possible d'améliorer ces résultats en augmentant progressivement le couple de freinage en fonction de la période de résonance du système, puis en maintenant un freinage constant à 2,5/s<sup>2</sup> et enfin en le réduisant progressivement : théoriquement, l'accélération ne dépasserait pas 2,68 m/s<sup>2</sup> à la cage. Dans un cas réel, la décélération de la cage devrait être maintenue autour de 3 m/s<sup>2</sup> à la cage avec un tel système (Beus et Ruest, 2002).

Le système de freinage doit être en mesure de :

- i. Calculer la fréquence naturelle de l'ensemble cage-câble en fonction de la position de la cage et de sa charge (plus la cage est profonde et lourde, plus la période du système est grande);
- ii. Contrôler le couple de freinage avec des décélérations qui augmentent jusqu'à un plateau de 2,5 m/s<sup>2</sup>, puis diminuent.

Le système développé par Beus et Ruest (2002) repose sur un microordinateur effectuant le calcul en temps réel des « rampes » pour le freinage, en fonction de la profondeur et de la charge de la cage. Lors d'un freinage d'urgence, une rampe précalculée est utilisée pour gagner en temps de réaction. Le microordinateur est équipé de quatre processeurs pour plus de sécurité, et d'une valve par sous-système de freinage. La défaillance d'un sous-système ne remet pas en cause la sécurité du système complet. Ce système de freinage est installé à la mine Val Reefs dans le puits 11<sup>21</sup> (en Afrique du Sud,). Le puits 11 est le plus profond du monde (Shaft Sinkers, 2014).

### **3.4.3 Utilisation de câbles de nouvelle génération : les câbles mixtes**

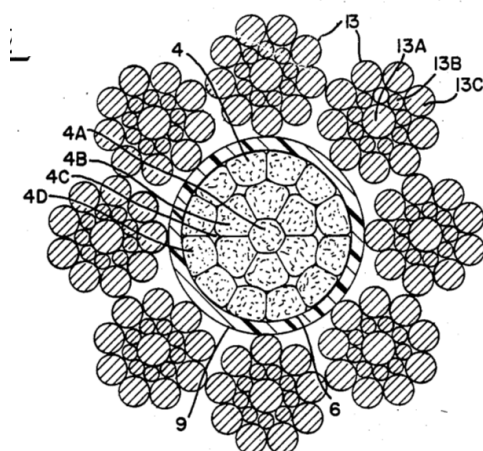
Par câbles mixtes on entend des câbles qui ne sont pas réalisés à 100 % en acier. Parmi ces câbles, certains peuvent avoir un cœur en fibres synthétiques ou simplement utiliser un autre composant pour améliorer les caractéristiques.

L'idée de câbles avec cœur en fibres [Figure 13] plutôt qu'en acier, pour éviter le problème de corrosion, est assez ancienne, mais s'est longtemps heurtée à des problèmes de faisabilité (Ridge et al., 2007). Si les câbles 100 % synthétiques (en fibres d'aramide) ne sont pas prêts pour une utilisation dans les prochains mois, les câbles avec cœur en fibre sont une solution disponible dès aujourd'hui (Klees et al., 1989; Ridge et al., 2007). L'avantage de ce type de câble est de proposer une résistance similaire pour un poids moindre : ainsi, pour les puits très profonds

---

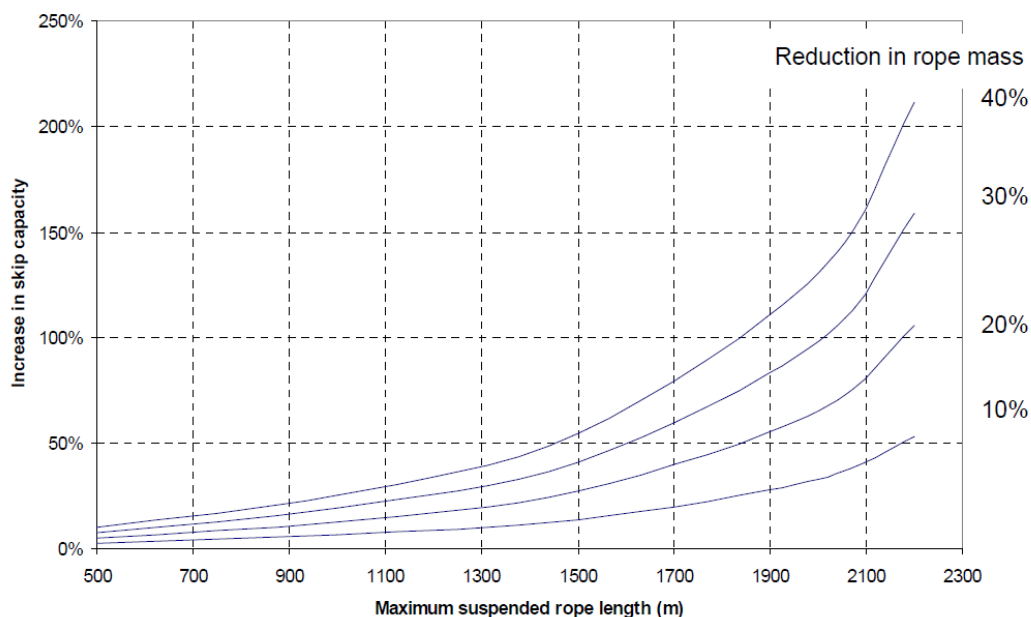
<sup>21</sup> Cette mine est connue, car il y a eu un accident dans le puits 2 en mai 2002 avec le décès de 105 mineurs.

où le poids du câble est critique, il est possible de transporter des charges plus lourdes dans le skip [Figure 14]. Des travaux de recherche sur les câbles 100 % synthétiques, et des essais in situ, devraient être menés par CanMet au cours des prochaines années (dans un puits de mine désaffecté au Québec).



**Figure 13. Conception de câble mixte (4 : cœur en Kevlar, 13 : torons en acier).**

De « Rope with fiber core and method of forming same », par D. A. Klees, R. B. Hoganson et H. L. Data, 1989, brevet américain n° US 4,887,422, p. 1. ©USPTO, 1989. Reproduit avec permission.



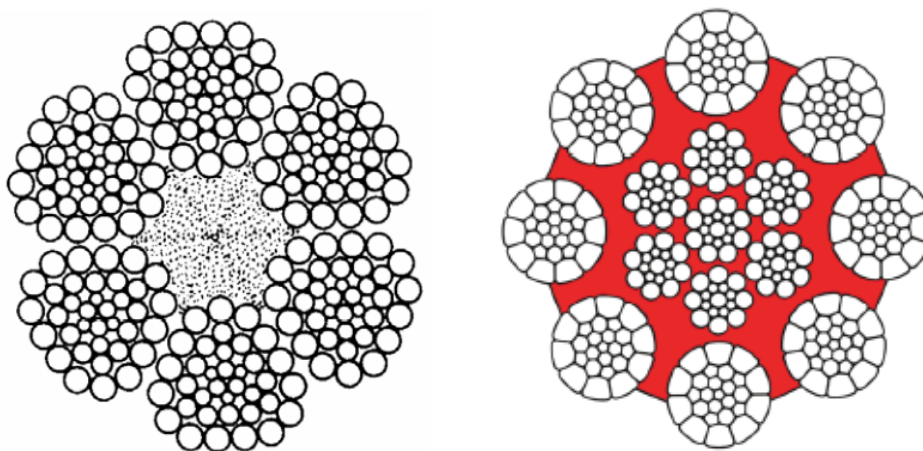
**Figure 14. Augmentation de la charge en fonction de la longueur du câble et de la réduction de son poids propre.**

De « High strength fibre cored steel wire rope for deep hoisting applications », par I. M. L. Ridge, N. O'Hear, R. Verreet, O. Grabandt et C. A. Das, 2007, OIPEEC Conference, p. 228. ©OIPEEC, 2007. Reproduit avec permission.

Une étude de cas est rapportée par Kleynhansm *et al.* (2007). Le puits est équipé d'un câble d'extraction de 54 mm, habituellement à torons triangulaires [Figure 15], et fait 837 m de profondeur. Le skip pèse 11,5 T à vide et peut prendre une charge de 16,5 T. La durée de vie moyenne du câble utilisé habituellement est de 16,7 mois, soit 117 000 cycles (maximum atteint : 20,3 mois, soit 142 000 cycles environ) avec un FS de 5,78 (Kleynhansm J. *et al.*, 2007). La principale cause de dépose des câbles était la présence de fils cassés en surface au tambour, dus à l'empilement des couches successives du câble. La compagnie minière a ensuite essayé un câble de type Turboplast (cœur en plastique) de CASAR [Figure 15], avec une meilleure résistance à l'écrasement (Kleynhansm J. *et al.*, 2007).

Ce type de câble a été garanti par le fabricant pour 250 000 cycles, sur lesquels 220 000 ont été effectués lors de la publication de l'article, sans signes apparents de fatigues (et donc une durée de vie attendue dépassant 250 000 cycles). Par ailleurs, pour augmenter la durée de vie, un système de lubrification automatique permanent (tous les 300 cycles) a été installé (Kleynhansm J. *et al.*, 2007).

Un câble de ce type a également été utilisé dans le puits n°2 de la mine Driefontein (Greyling *et al.*, 2007; Van Rensburg *et al.*, 2009). Dans ce cas-là, le câble n'a pas atteint la performance promise par le fabricant et a même été moins endurant qu'un câble à torons triangulaires standard. Cette usure prématurée a été expliquée par un diamètre de gorge trop faible et par le fait que les câbles de ce type se déforment moins du fait de l'insert en plastique. Par ailleurs, une inspection plus approfondie a montré que de grandes forces dynamiques ont été subies par le câble (Van Rensburg *et al.*, 2009). Les essais de Ridge *et al.* (2007) montrent que le comportement en fatigue des câbles à cœur en fibre est comparable, sinon meilleur, à celui d'un câble avec un cœur standard entouré de plastique.



**Figure 15. Coupe typique pour un câble à torons triangulaires (à gauche) et un câble avec un cœur entouré de plastique (à droite).**

De « A case study of 54mm 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.

### 3.5 Arbre de défaillance

La partie de l'arbre de défaillance [Annexe VI] discutée dans cette section est seulement la branche « La cage n'est plus retenue par le câble ». Pour cette branche on compte :

- trois événements élémentaires liés au détachement du câble (F1, F2, F3);
- un événement élémentaire lié à la mauvaise sélection du câble / usage (F4);
- trois événements élémentaires liés à une charge statique trop grande (G1, G2, G3) avec certaines conditions de fonctionnement normales;
- un événement élémentaire lié à une charge quasi statique trop grande (G4) avec certaines conditions de fonctionnement normales;
- onze événements élémentaires liés à une charge dynamique trop grande (G3, G7, G8, G9, G10, H1, H2, H4, H5, H6, H7) avec certaines conditions de fonctionnement normales.

On peut donc remarquer que la majorité des éléments élémentaires à l'origine d'une rupture de câble sont liés à une charge dynamique trop grande. Il faudrait donc être en mesure de suivre avec précision la charge dans le câble en temps réel pour réduire l'apparition de causes élémentaires liées à la charge dynamique.

### 3.6 Synthèse et recommandations

En utilisant une approche probabiliste et en mettant l'emphase sur le suivi, l'entretien et la qualité des câbles d'extraction, l'Afrique du Sud a choisi de se passer des parachutes. L'efficacité de ce choix ne repose pas uniquement sur des mesures techniques, mais également sur des mesures qui permettent de contrer les erreurs humaines et organisationnelles. De plus, une perte des connaissances techniques nécessaires au suivi et à l'entretien des câbles et des machines d'extraction pourrait survenir au Québec dans les prochaines années et une planification à moyen terme permettrait d'éviter cela.

Même si la suppression des parachutes n'est pas la voie privilégiée par les législateurs en Amérique du Nord compte tenu de l'approche déterministe de ces législateurs, il reste qu'une des principales mesures qui permet d'éviter l'écrasement de la cage consiste à utiliser des câbles d'extraction en bon état. À moyen terme, ces câbles d'extraction en acier seront peut-être remplacés par des câbles 100 % synthétiques, non sujets à la corrosion, mais d'ici là, l'entretien régulier, le suivi continu et le contrôle des charges dynamiques sont trois axes de développement à privilégier pour améliorer la sécurité des transporteurs de mines. La lubrification des câbles ne doit pas être négligée, mais il semble que des améliorations soient possibles sur ce point : compatibilité des lubrifiants utilisés, fréquence de lubrification, élimination du lubrifiant périmé, etc.

Les processus d'endommagement et d'usure des câbles doivent être bien compris afin de pouvoir estimer au mieux leur durée de vie résiduelle. Il est important de se rappeler que l'usure et la fatigue ne sont pas dues à une cause unique, mais à une combinaison d'effets lors de l'utilisation quotidienne des câbles. Par ailleurs, la résistance à la rupture n'est pas homogène le long du câble. Or les essais de rupture sont faits à l'attache pour des raisons pratiques et économiques et toute usure prématurée du câble doit attirer l'attention de l'inspecteur ou du responsable de la machine d'extraction, même si les tests de ruptures sont concluants.

Les effets cumulatifs de vieillissement devraient être considérés pour tous les câbles d'extraction selon la norme ISO 4309 ou selon la norme SABS0293 afin de tenir compte des différents mécanismes de vieillissement en jeu. Enfin, les essais électromagnétiques et l'inspection des câbles devraient être faits par des inspecteurs expérimentés. En ce sens, le processus de certification sud-africain pourrait être un exemple à suivre au Canada pour améliorer la sécurité des travailleurs transportés dans les cages.

## **Recommandations**

Afin d'améliorer la performance des câbles d'extraction, nous formulons les recommandations suivantes. Il appartiendra au législateur de considérer si tout ou partie de ces recommandations doivent être intégrés dans les textes de loi, et aux industriels de mettre en place certaines de ces recommandations s'ils les jugent pertinentes. Les recommandations sont présentées en ordre séquentiel sans organisation par niveau d'importance, mais en suivant le plan de présentation de la section.

### **Recommandation 3.1 :**

Prendre en considération les facteurs humains et organisationnels sud-africains qui ont été omis lors de l'intégration des codes de pratique SABS0293 et SABS0294 dans le RSSM (par exemple, désignation d'un ingénieur responsable de la machine d'extraction).

### **Recommandation 3.2 :**

Considérer les effets d'endommagement cumulatif des câbles dans les critères de retrait de tous les câbles (pas seulement ceux dont le FS est réduit), soit avec la méthode du SABS0293, soit avec celle de l'ISO 4309.

### **Recommandation 3.3 :**

Effectuer les examens visuels quotidiens des câbles à une vitesse réduite avec un éclairage fixe de minimum 800 lux sur une longueur correspondant à 1 seconde de défilement du câble.

### **Recommandation 3.4 :**

Généraliser l'utilisation de systèmes de suivi continu de l'état du câble reliés au système de commande de la machine d'extraction, ou à tout le moins à un système d'alarme. Ce type de système existe et est déjà utilisé dans certaines mines au Québec.

### **Recommandation 3.5 :**

Généraliser l'utilisation d'un système de suivi continu de la charge dans le câble relié à la machine d'extraction, ou à tout le moins à un système d'alarme. Ce type de système existe et est déjà utilisé dans certaines mines au Québec.

### **Recommandation 3.6 :**

Investir dans la recherche sur les câbles d'extraction : modes de fatigue et de rupture, développement de câbles d'extraction hybrides ou 100 % synthétiques.

### **Recommandation 3.7 :**

Qu'un organisme collige les résultats d'essais de rupture des câbles, les conditions d'utilisation de ces câbles dans les différents puits du Québec, les rapports d'inspection électromagnétique

et les avis d'incidents (machine d'extraction, molette, câble d'extraction, cage, skip, cuffat ou boisage du puits) afin de proposer une base de données complète et à jour. Cette base de données pourra être utilisée (i) à des fins statistiques, (ii) à des fins de recherche (si désiré) dans l'optique d'améliorer la sécurité des transporteurs miniers. Une base de données de ce type existe en Afrique du Sud et est maintenue à jour par le *district mining engineer/government mining engineer* (DME/GME) (Udd, 2004).

Recommandation 3.8 :

Qu'un organisme indépendant (éventuellement pancanadien), s'inspirant des pratiques sud-africaines, soit mis en place pour former et superviser les inspecteurs de câbles.

Recommandation 3.9 :

Que des tests non destructifs soient effectués sur la partie du câble qui reste normalement enroulée sur le tambour. La fréquence de ses tests pourra être inférieure à celle des tests réglementaires réalisés sur le reste du câble.

## 4. PARACHUTES TRADITIONNELS

En cas de rupture du câble d'extraction, les parachutes constituent la dernière sécurité permettant d'éviter l'écrasement de la cage. Ce type de système, obligatoire pour le transport de personnel (sauf pour un skip ou pour une cage d'une installation de machine d'extraction multicâble), est relativement ancien (Giraud et Galy, 2022).

Le principe physique du parachute est de créer une force résistante dans le sens opposé du déplacement de la cage pour arrêter le mouvement de la cage [Figure 16]. Cette force est créée par la « coupe » du bois des guides à l'aide de dents qui s'y enfonce.

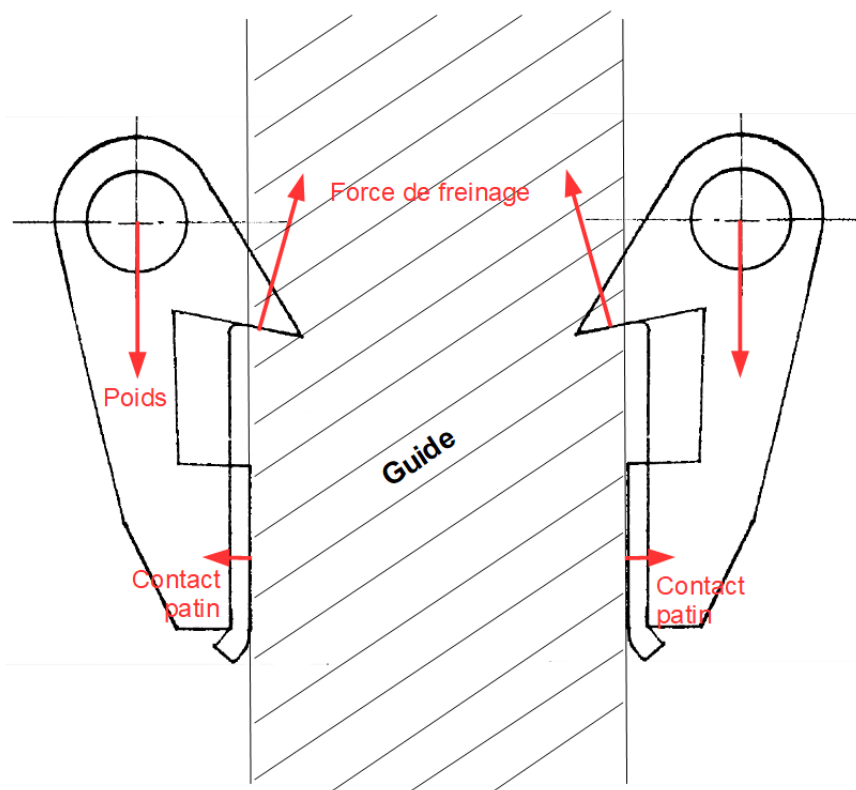


Figure 16. Principe de fonctionnement des parachutes traditionnels.

## 4.1 Considérations générales

### 4.1.1 Le parachute de type « Ontario » à dent simple

Les parachutes traditionnels ont fait l'objet d'une étude particulière à la suite de l'accident de Paymaster en 1945 (Young, 1947). Les nombreux essais ont mis en évidence plusieurs points (Young, 1947) :

- Sur 116 essais effectués dans les deux ans qui ont suivi l'accident de Paymaster, 14 ont montré que les parachutes n'ont pas fonctionné correctement (12,1 %), cependant certains de ces tests avaient pour objet de déterminer les limites de fonctionnement des parachutes;
- Les raisons de ces échecs ont été identifiées : cinq cas où les dents ont été retournées (*turning over*), trois cas avec bourrage des dents, deux cas où le guide a refoulé les dents (*guide buckling*), deux cas avec des guides ou joints défectueux, un cas où les dents étaient trop courtes, et un cas de traîne de câble;
- Le système fonctionne aussi bien à grande ou faible vitesse (plusieurs tests ont été effectués à des vitesses comprises entre 1200 et plus de 2000 pieds/min);
- Le ratio de force du ressort a peu d'impact sur le succès ou l'échec de l'arrêt. Le rapport recommande, comme bonne pratique, un ressort taré à 30 %-50 % du poids de la cage vide (Larsen *et al.*, 1972);
- Il faut minimiser le nombre de dents et les allonger un peu;
- Pour 63 % des essais effectués, la décélération mesurée n'a pas excédé 3 g et les modifications successives aux parachutes ont permis d'ajuster la valeur de décélération;
- Il faut éviter les traînes de câble, qui empêchent le déclenchement des parachutes ou les désengagent après leur déclenchement.

À la suite de ces essais, une géométrie de parachute a été recommandée [Figure 17], et est communément appelée *Ontario dog* (parachute de type Ontario) aujourd'hui. En effet les parachutes de type Ontario ont montré une performance consistante et des décélérations relativement limitées par rapport à d'autres géométries (Larsen *et al.*, 1972).





**Figure 17. Parachute de type « Ontario », à dent simple.**

La force du ressort n'influence pas la décélération. Cependant, un ressort puissant permettra aux dents de se planter dans les guides même s'ils sont durs. Pour sa part, le ratio « force du ressort/poids de la cage à vide » influence, de façon inverse, le déclenchement intempestif du parachute et la résistance à la trainée de câble [Tableau 3]. Les informations, non exhaustives, recueillies au Québec en 2014-2015 lors de la réalisation de cette expertise font états de ressorts tarés entre 18 % et 41 %.

**Tableau 3. Effets de la force du ressort par rapport au poids de la cage à vide**

Ratio force du ressort / poids de la cage à vide	Décélération verticale déclenchant le parachute à vide (g) (valeur minimale) « déclenchement intempestif »	Résistance à la trainée de câble (à poids de cage constant)
R = 1 % (ressort très faible)	-0,99 g (quasi apesanteur)	Très faible
R = 30 %	-0,7 g	Faible
R = 70 %	-0,3 g	Bonne
R = 99 % (ressort très fort)	-0,01 g (micro décélération)	Très bonne

Il ressort du tableau 3 qu'un ressort avec un ratio R voisin de 0 ne créera presque jamais de déclenchement intempestif du parachute, mais en contrepartie le système sera très sensible au phénomène de trainée de câble. Inversement, un ressort avec un ratio voisin de 1 créera souvent des déclenchements intempestifs du parachute, mais en contrepartie le système sera peu sensible au phénomène de trainée de câble. Les traînes de câble étaient un problème majeur dans la conception des parachutes au milieu du XXe siècle, mais ce point négatif a été éliminé grâce aux parachutes de type « Ontario » associé à un ressort bien taré, car l'arrêt se fait en quelques mètres (Larsen *et al.*, 1972).

Prenons des exemples numériques pour illustrer quelques concepts.

Déclenchement intempestif :

Pour une cage vide de 5000 lbs, avec un ressort d'une force de 2000 lbs, on a donc un tarage de 40 %.

Le déclenchement intempestif, pour la cage vide, surviendrait si la tension dans le câble descendait sous la barre de 2000 lbs, soit une décélération de -0,6 g.

Avec une charge de 2000 lbs dans la cage, le déclenchement survient pour une décélération de -0,71 g

Avec une charge de 10000 lbs dans la cage, le déclenchement survient pour une décélération de -0,87 g

=> plus la charge de la cage augmente, moins le risque de déclenchement intempestif est significatif.

Traîne de câble :

La traîne de câble est affectée par la force du ressort : un ressort de 500 lbs sera plus facilement sujet à une traîne de câble qu'un ressort de 5000 lbs

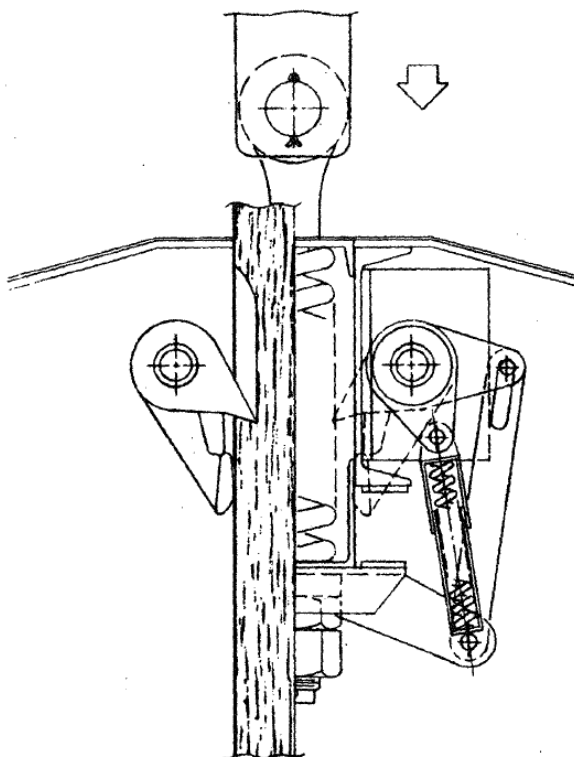
**À poids de la cage constant :** plus le tarage du ressort est grand, plus la résistance à la traîne de câble est grande (cage de 5000 lbs, tarage de 10 % = ressort de 500 lbs, tarage de 50 % = ressort de 2500 lbs)

**À tarage du ressort constant en %,** plus la cage à vide est pesante, plus la résistance à la traîne de câble est grande (prenons un tarage de 20 %, pour une cage de 5000 lbs => cela donne un ressort de 1000 lbs, pour une cage de 10000 lbs => cela donne un ressort de 2000 lbs)

Allègement des cages :

Il faudrait avoir un tarage un peu plus élevé pour les cages légères (ressort avec force assez grande pour éviter les traînes de câble), peut-être de l'ordre de 40 %-50 %, ce qui n'aurait probablement pas d'impact significatif sur le risque de déclenchement intempestif à vide.

Le principe du mécanisme anti-traîne de câble trouvé dans la littérature est le suivant : une fois que le système parachute est enclenché, il reste enclenché tant que l'effort de traction sur l'attache est inférieur à la masse de la cage. Pour désengager les dents, il faut alors soulever la cage. La figure 18 montre un mécanisme anti-traîne de câble en position active (empêchant le retrait de la dent à moins d'un soulèvement de la cage). Nous n'avons pas vu ce système lors de nos visites et à notre connaissance ce système ou un système équivalent n'est pas utilisé au Québec.



**Figure 18. Mécanisme anti traîne de câble.**

De « Investigation of requirements and performance of safety catches on wire rope suspended, man-carrying conveyances in U.S. coal mines », par C. H. Larsen, R. A. Egen et H. A. Cress, 1972, p. 34 ©CDC, 1972. Reproduit avec permission.

#### **4.1.2 La décélération et les facteurs l'influencent**

##### **Décélération supportable pour un humain**

Le problème de ce système traditionnel est la décélération souvent importante qu'il génère, 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 (McIvor, 1996; R-ON, 2013). La décélération sera plus importante lorsque la cage est vide (Gorzalczynski, 2002) car le test est réalisée avec une charge équivalente au nombre maximum de personnes transportées avec l'équipement autorisé<sup>22</sup>.

Les décélérationes que l'être humain peut supporter varient d'un individu à l'autre et sont fonction de la position du corps. D'un point de vue physiologique, le tableau 4 indique les accélérations limites supportables sans dégâts aux organes internes.

Pour une personne debout, une décélération de 2,5 g ne devrait pas engendrer de blessure importante (Larsen *et al.*, 1972). Cette remarque rejoint les conclusions du rapport sur l'accident

<sup>22</sup> Art. 232 R.R.O. 1990, Reg. 854: (7) *Free fall tests shall be performed under the following conditions:*

1. *The cage or skip must carry a weight equal to its maximum permitted load of persons and any material permitted to be carried at the same time.*

de Paymaster : plusieurs cas ont été observés pour lesquels une décélération de l'ordre de 3 g n'a pas engendré de blessures graves (et même un cas avec une décélération de 4 g, durant laquelle seulement 4 des 9 travailleurs ont subi des blessures, légères « *of a minor nature* ») (Young, 1947). De fait, la limite supérieure pour les décélérations est de 3 g pour la plupart des réglementations provinciales, ce qui correspond à la limite pratique fixée par l'Ontario après les essais menés dans les années 40 (Larsen *et al.*, 1972). Il ne faut cependant pas oublier, qu'une chute, même de plain-pied, peut engendrer des blessures graves (au Québec, on recense un travailleur qui a eu une jambe brisée lors d'un freinage d'urgence au tambour).

**Tableau 4. Accélérations subies par des humains et leurs effets**  
(Voshell, 2004)

Accélération	Commentaires
3 g	Pour la plupart des gens, pas de problèmes jusqu'à une durée de 25 secondes
18 g	Dommages physiques (rupture de vaisseaux capillaires)
46,2 g	Accélération maximale à laquelle un humain a survécu

Pour appuyer cette valeur de 2.5 g, Larsen *et al.* (1972) la comparent à l'atterrissage d'un parachute militaire, qui engendre une décélération de l'ordre de 3 à 4 g (sur 0,1 à 0,2 s) sans pour autant blesser les parachutistes. Cependant, les parachutistes peuvent anticiper la décélération, ce qui n'est pas le cas des travailleurs dans la cage lors de la rupture du câble.

Vitesse de descente d'un parachute militaire = 4,8 m/s

Distance d'arrêt = 0,4 m (soit environ la moitié de la hauteur jusqu'à la taille d'un humain)

On obtient :

$$a = \frac{v^2}{2D_a} = \frac{4.8^2}{0.8} = 28.8 \text{ m/s}^2 = 2.93 \text{ g}$$

Si la décélération engendrée par les parachutes traditionnels est supportable, et ne devrait, dans la plupart des cas, pas engendrer de blessures graves, il faut veiller à limiter les décélérations autant que possible. En effet, si une décélération de 3 g, pour un arrêt d'urgence peut être une limite acceptable, il ne faut pas oublier qu'une cage vide subira une décélération plus importante qu'une cage pleine. Ainsi, fixer une limite supérieure à 2 g, à pleine charge (comme en Ontario actuellement), semble être une option tout à fait raisonnable.

La section 3.3 discute de la pertinence d'une limite inférieure (0,9 ou 1 g dans les réglementations provinciales) et de ses conséquences sur les décélérations d'une cage de grande capacité avec peu d'occupants. Les intervalles de décélération autorisés dans les réglementations provinciales sont rappelés au tableau 5.

**Tableau 5. Intervalles de décélération autorisés dans les réglementations provinciales**

Provinces	QC	ON	AB	SK	YT	NT	BC	NB	NS	MB	NU	NL
Décélération (m/s <sup>2</sup> )	/	9-20	/	/	9,8-29,4	9,8-29,4	9,8-29,4	9,8-29,4	8,8-19,6	9,8-29,4	9,8-29,4	/

### Les facteurs influençant la décélération

Les résultats des essais de chute libre sont affectés par différents facteurs (Barry, 1982; McIvor, 1996) :

- L'angle de la dent ( $\alpha$ ) [Figure 19] : souvent cet angle vaut 15° (varie entre 5° et 25°). La décélération est deux fois plus grande lorsque l'angle fait 25° plutôt que 5°. Pour un angle qui passe de 0° à 10°, la perte de force de freinage est de l'ordre de 65 % (Penning *et al.*, 1980);
- Le périmètre de taille de la dent dans le guide : la résistance est proportionnelle à la section et au périmètre de l'entaille dans le bois. Pour une aire entaillée constante, si le périmètre de l'entaille diminue alors la résistance diminue. Ainsi, si l'on souhaite augmenter la force résistante du parachute sans augmenter la section d'entaille, on peut opter pour des dents séparées (*split teeth*), mais cette solution entraîne un risque de bourrage;
- L'humidité des guides : il y a une perte de 1 g de décélération pour une augmentation de l'humidité de 45 %. Cependant, si l'humidité est trop faible, le bois risque de se fendre (ce que montrent les tests à INCO). Selon Gorzalczynski (2002), l'humidité idéale pour une bonne décélération se situerait entre 25 % et 40 %. En dessous de 25 % les décélérations seront très importantes et il y aura un risque d'éclatement des guides. Ces faibles taux d'humidité sont courants pour les puits bétonnés avec entrée d'air *downcast* (souvent en dessous de 15 % d'humidité). Toujours selon Gorzalczynski (2002), au-delà de 60 % d'humidité, il n'y a presque plus de décélération. Barry (1982) mentionne qu'un test effectué avec un bois très sec dans une tour et donnant une décélération de 3,2 g pourrait être accepté s'il est certain que les guides auront un taux d'humidité plus élevé dans le puits;
- Le grain des guides : plus le bois est dense et le grain rectiligne, plus la décélération est grande (jusqu'à 1 g de plus). Pour ce qui est de l'orientation du grain, la conclusion n'est pas définitive (Penning *et al.*, 1980);
- La présence de nœuds dans le guide : on note souvent un éclatement lorsque la dent du parachute arrive sur un nœud.

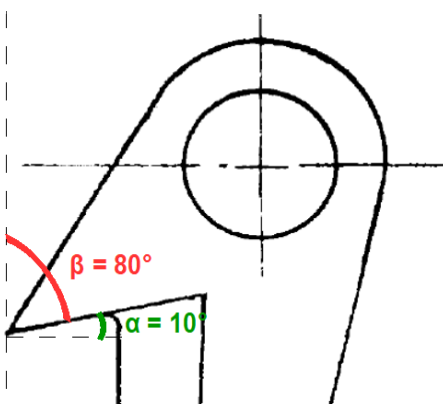


Figure 19. Notations pour l'angle de la dent.

De nombreux essais effectués par McIvor (1996) montrent que la vitesse d'essai influence peu la décélération. C'est l'essence du bois utilisé pour les guides qui influence particulièrement la décélération. Ceci a également été relevé dans le rapport de Penning *et al.* (1980). Un test de dégagement rapide, à vitesse initiale nulle, permet donc de donner une bonne idée de la décélération moyenne qui sera obtenue à plus haute vitesse. McIvor indique que toutes les informations nécessaires peuvent être obtenues avec une chute libre de 3' environ, ce qui équivaut à une vitesse d'extraction de 835 pi/min. Des essais ont été faits avec du bois d'ingénierie, mais celui-ci, s'il a bien fonctionné en laboratoire, n'est à notre connaissance pas utilisé in situ.

#### 4.1.3 Mise en équation de la décélération

En chute libre sans frottement, la vitesse de chute libre  $v$  est indépendante du poids :

$$v = \sqrt{2gh} \quad (4.1)$$

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 :

$$a = \frac{v^2}{2D_a} \quad (4.2)$$

Avec  $D_a$  la distance d'arrêt (une fois les dents engagées dans les guides en bois).

En utilisant le principe de conservation d'énergie, on a :

$$F \times D_a = W (h + D_a) \quad (4.3)$$

Donc

$$F = W \left( \frac{h}{D_a} + 1 \right) \quad (4.4)$$

Avec  $F$  la force de freinage et  $W$  le poids de la cage (en newtons).

## 4.2 Effet des dents des parachutes dans le bois

### 4.2.1 Principe général

Le principe détaillé du fonctionnement d'un parachute de type « Ontario » est présenté à la figure 20 (Penning *et al.*, 1980). Le rôle du patin (*heel*) est de garantir la valeur de l'angle de la dent  $\alpha$  (*tooth angle*) et d'éviter le retournement de la dent, sous l'effet du moment associé à la force de freinage  $F$  est exprimée dans l'équation (4.5).

$$F = N \cdot A \cdot \sigma_{cr} \quad (4.5)$$

Avec  $N$  le nombre de dents,  $A$  l'aire de coupe d'une dent et  $\sigma_{cr}$  la contrainte d'écrasement (*crushing stress*) qui est fonction de l'angle de la dent (ce qui est équivalent à la résistance moyenne du bois  $F/T$  dans la fiche de résultats standardisée de l'Ontario).

$F$  est appelé indifféremment force de freinage ou résistance moyenne du bois. Les deux termes seront utilisés selon leur sens dans la suite du rapport.

Le principe de freinage du parachute est similaire au principe utilisé lors de l'usinage orthogonal du bois en direction  $90^\circ-0^\circ$  (Cool, 2007) [Annexe IV] comme avec un rabot. Cependant, les vitesses de coupe sont différentes, car les vitesses de coupe standards utilisées pour l'usinage du bois sont comprises entre 50 et 100 m/s alors que la vitesse lors de l'enclenchement du parachute va être de l'ordre de 5-8 m/s.

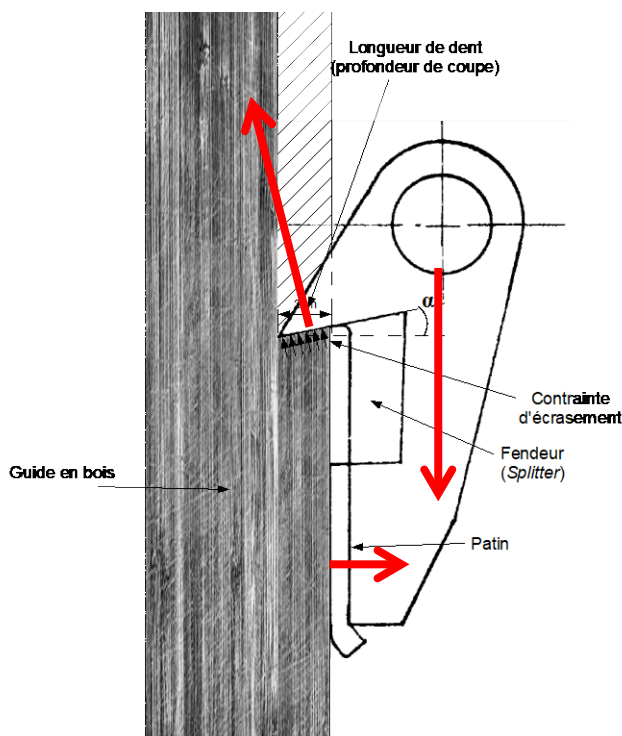


Figure 20. Principe de fonctionnement du parachute de type « Ontario ».

#### 4.2.2 Relations empiriques de la force de freinage $F$ par dent

Le rapport de Larsen *et al.* (1972) répertorie 3 relations empiriques développées par des constructeurs de parachutes, permettant d'estimer la force de freinage par dent ( $F_d$ ) en fonction de ses caractéristiques géométrique ( $P$ ,  $L$  et  $\alpha$ ) pour un bois donné (*BC Fir*).

$$F_d = C \cdot L \cdot P \quad (4.6)$$

$$F_d = C_1 \cdot P + C_2 \cdot L \quad (4.7)$$

$$F_d = 1730 \cdot P \cdot L + 542(4 \cdot P + 2 \cdot L) \quad (4.8)$$

Où  $P$  est la profondeur d'entaille de la dent (mesurée perpendiculairement à l'axe du guide),  $L$  sa largeur et les constantes  $C$ ,  $C_1$  et  $C_2$  sont définies dans les tableaux 6 et 7, en fonction de l'angle  $\alpha$  de la dent.

**Tableau 6. Constante C pour l'équation (4.6)**

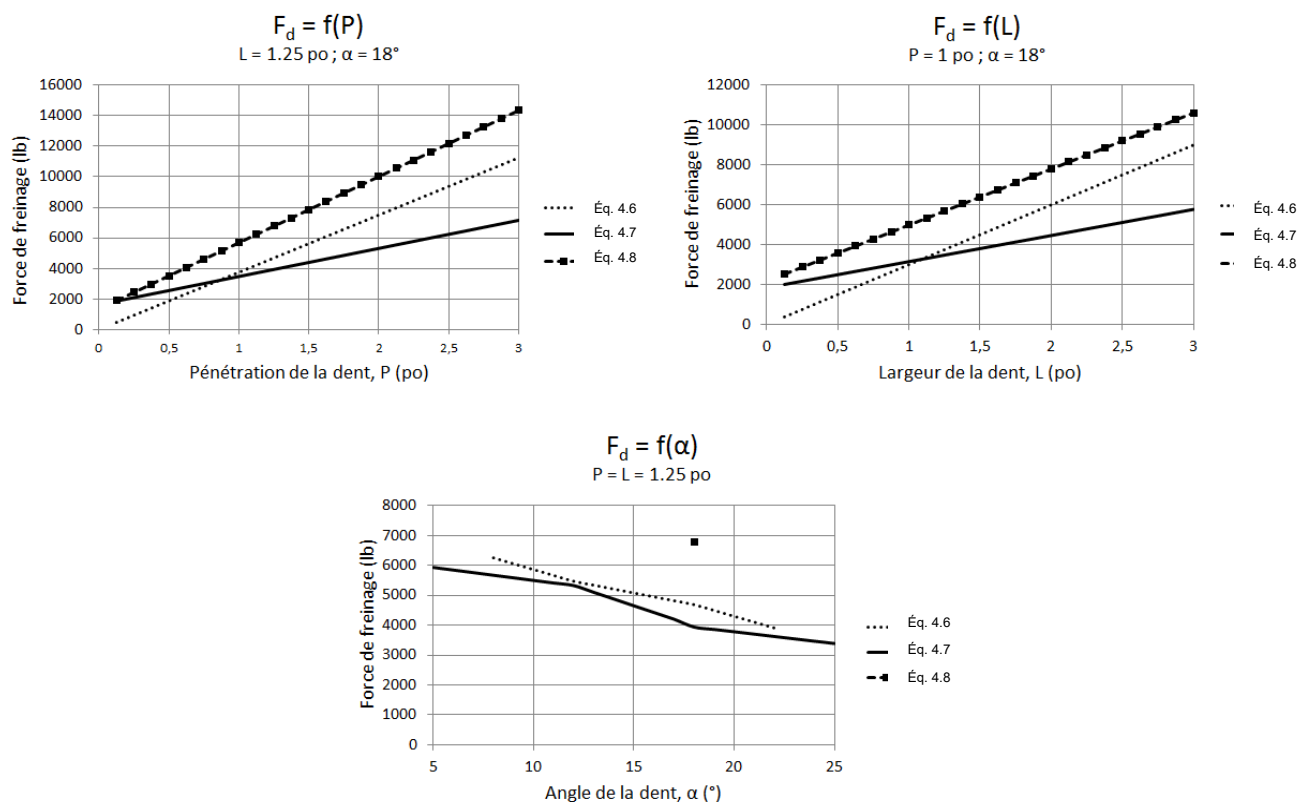
Angle $\alpha$	C (lb/po)
8°	4000
12°	3500
18°	3000
22°	2500

**Tableau 7. Constantes C1 et C2 pour l'équation (4.7)**

Angle $\alpha$	$C_1$ (lb/po)	$C_2$ (lb/po)
5°	2880	1865
12°	2580	1680
18°	1840	1310
25°	1530	1180

L'équation (4.7) donne les meilleurs résultats : l'erreur relative est la plus faible comparativement aux équations (4.6) et (4.8) (Larsen *et al.*, 1972). Les équations sont présentées sous forme graphique dans la figure 21, en faisant varier seulement un paramètre à chaque fois.



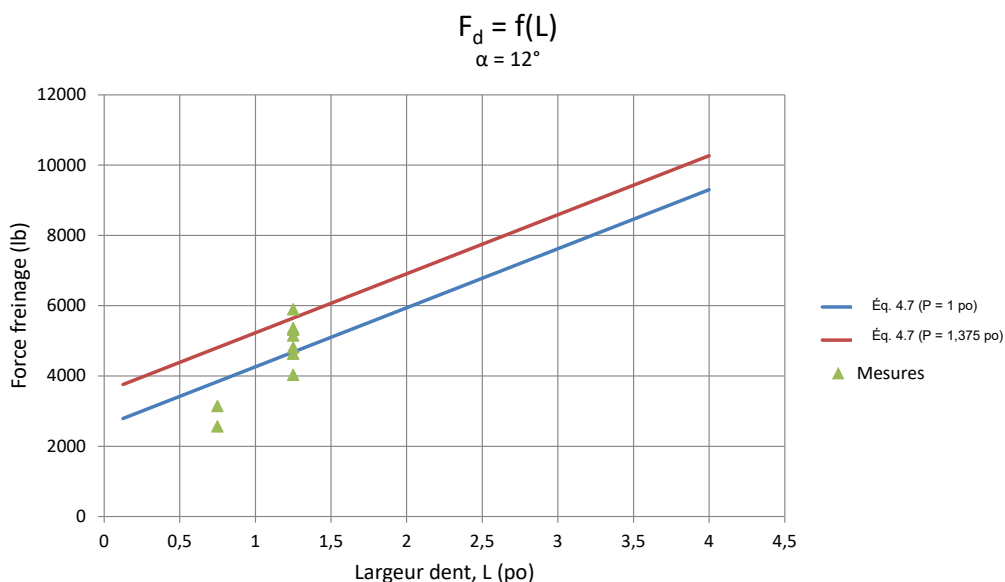


**Figure 21. Comparaison des équations 4.6, 4.7 et 4.8 en fonction des trois paramètres, P, L et  $\alpha$ .**

L'équation (4.7) donne les résistances par dent les plus faibles dès que la profondeur dépasse 1 po (pour  $L = 1,25 \text{ po}$ ) ou que la largeur dépasse 1,2 po (pour  $P = 1 \text{ po}$ ). Outre le fait que ce soit l'équation la plus proche des résultats expérimentaux, ce constat est rassurant, car la force de freinage calculée sera rarement supérieure à la force de freinage réelle. Enfin, l'équation (4.7) donne également la résistance par dent la plus faible lorsque l'on fait varier l'angle  $\alpha$  (en conservant  $P = L = 1,25 \text{ po}$ ).

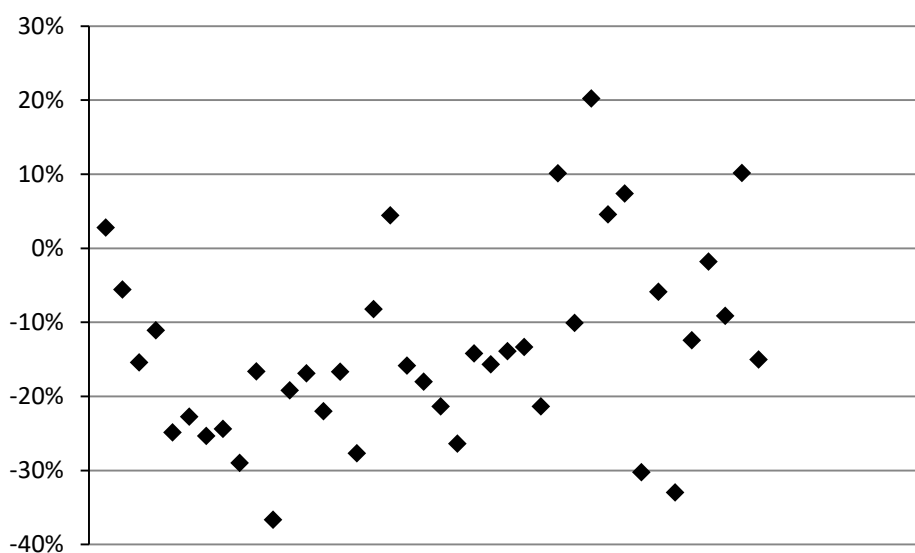
### Comparaison à des mesures *in situ*

Les résultats proposés par l'équation (4.7) sont présentés dans la figure 22 et comparés à des résultats expérimentaux présentés dans Larsen *et al.* (1972) pour deux profondeurs ( $P = 1$  po et  $P = 1,375$  po).



**Figure 22.** Comparaison des résultats prévus par l'équation 4.7 aux mesures *in situ* pour  $\alpha = 12^\circ$ .

Enfin, la figure 23 compare les résistances par dent pour les essais présentés dans deux rapports : Penning *et al.* (1980) et Larsen *et al.* (1972).



**Figure 23.** Erreur relative  $F/\text{dent}$  mesurée vs prévue (Eq. 4.7).

Sur ces deux études, il y a seulement 7 valeurs sur 40 positives, donc surestimées. Six des sept surestimations sont inférieures à 10 %. Globalement, la force de freinage par dent n'est surestimée que dans 17,5% des cas avec l'équation (4.7). L'erreur relative moyenne est une sous-estimation de 13,5 %, avec une surestimation maximale de 20,2 % et une sous-estimation maximale de 36,7 %.

### **4.2.3 Système de « compensation » de l'usure**

Les parachutes de type « Ontario » sont conçus pour compenser l'usure des guides. En effet, l'usure des guides (cumulée avec le mauvais ajustement des dents des parachutes) est une des causes du mauvais fonctionnement du parachute lors de l'accident de Paymaster (Young, 1947). Lors de cet accident, les dents ne se sont enfoncées dans le bois que de 3/16 po (soit environ 5 mm). La performance du mécanisme de compensation est discutée dans cette section.

Pour discuter de la performance du système de compensation de l'usure du guide, nous faisons référence à l'usure *sur un côté* du guide. Compte tenu qu'un système parachute comporte des dents en vis-à-vis, lorsque nous discutons d'une usure de 10 mm, la largeur du guide est en réalité réduite de 20 mm en tout (soit 10 mm de chaque côté). De la même manière, un guide « trop large de 10 mm » fait référence à une surlargeur de 10 mm par côté, soit 20 mm en tout.

#### **Impact de l'usure d'un guide sur la performance des parachutes**

Pour un guide usé [Figure 24], les hypothèses sont les suivantes :

- Le triangle ABC est indéformable;
- Le point A est l'axe de rotation de la dent;
- Le point B est en contact avec le guide;
- Le point C est l'extrémité de la dent qui entaille le guide.

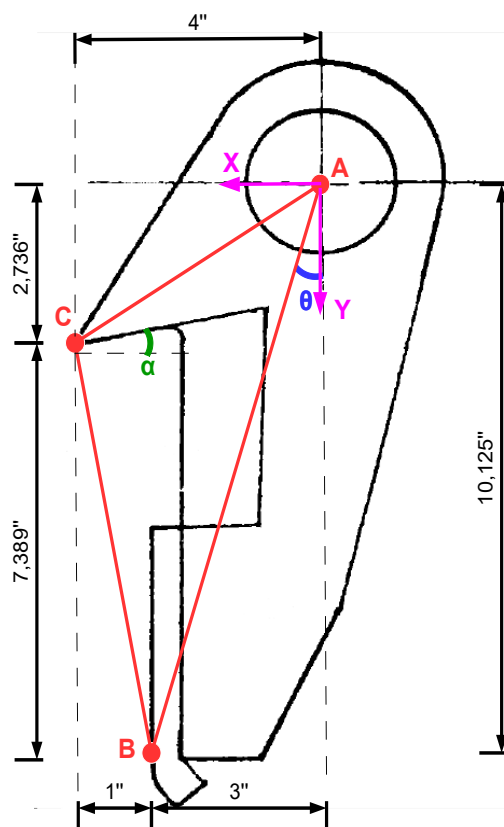


Figure 24. Parachute de type « Ontario », notations dans le cas où le guide est utilisé.

Les propriétés géométriques du triangle ABC et des angles identifiés sur la figure 24 sont données au tableau 8 pour trois géométries différentes de dent : trapue, normale et élancée. Le tableau 9 indique les coordonnées des points B et C dans un repère orthonormé, ayant pour origine A, en coordonnées polaires et cartésiennes.

Tableau 8. Propriétés géométriques

	Trapue	Normale	Élancée
<b>Longueurs</b>			
AB	8,66 po	10,56 po	12,49 po
BC	5,48 po	7,46 po	9,44 po
AC	4,85 po	4,85 po	4,85 po
<b>Angles</b>			
$\hat{A}$	35,38°	39,2°	41,73°
$\hat{B}$	30,83°	24,26°	20°
$\hat{C}$	113,79°	116,54°	118,27°
$\alpha$	10°	10°	10°
$\theta$	20,26°	16,5°	13,9°

**Tableau 9. Coordonnées des points B et C**

	B			C
	Trapu	Normal	Élancé	
Coordonnées polaires	$\begin{cases} r = 8.66 \\ \theta = 20.26^\circ \end{cases}$	$\begin{cases} r = 10.56 \\ \theta = 16.5^\circ \end{cases}$	$\begin{cases} r = 12.49 \\ \theta = 13.9^\circ \end{cases}$	$\begin{cases} r = 4.85 \\ \theta = 55.7^\circ \end{cases}$
Coordonnées cartésiennes	$\begin{cases} x = 3 \\ y = 8.125 \end{cases}$	$\begin{cases} x = 3 \\ y = 10.125 \end{cases}$	$\begin{cases} x = 3 \\ y = 12.125 \end{cases}$	$\begin{cases} x = 4 \\ y = 2.736 \end{cases}$

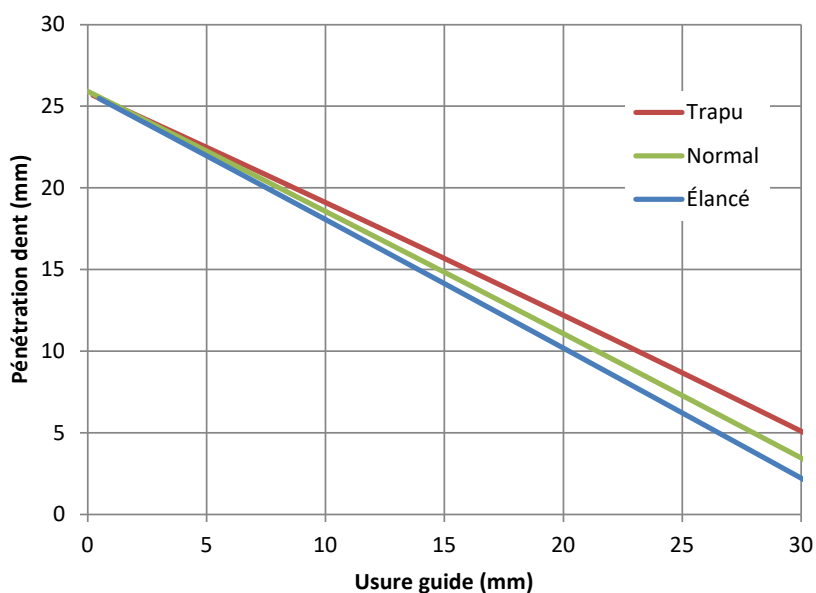
Avec :

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \\ y = r \cos \theta \end{cases}$$

Pour passer des coordonnées polaires aux coordonnées cartésiennes.

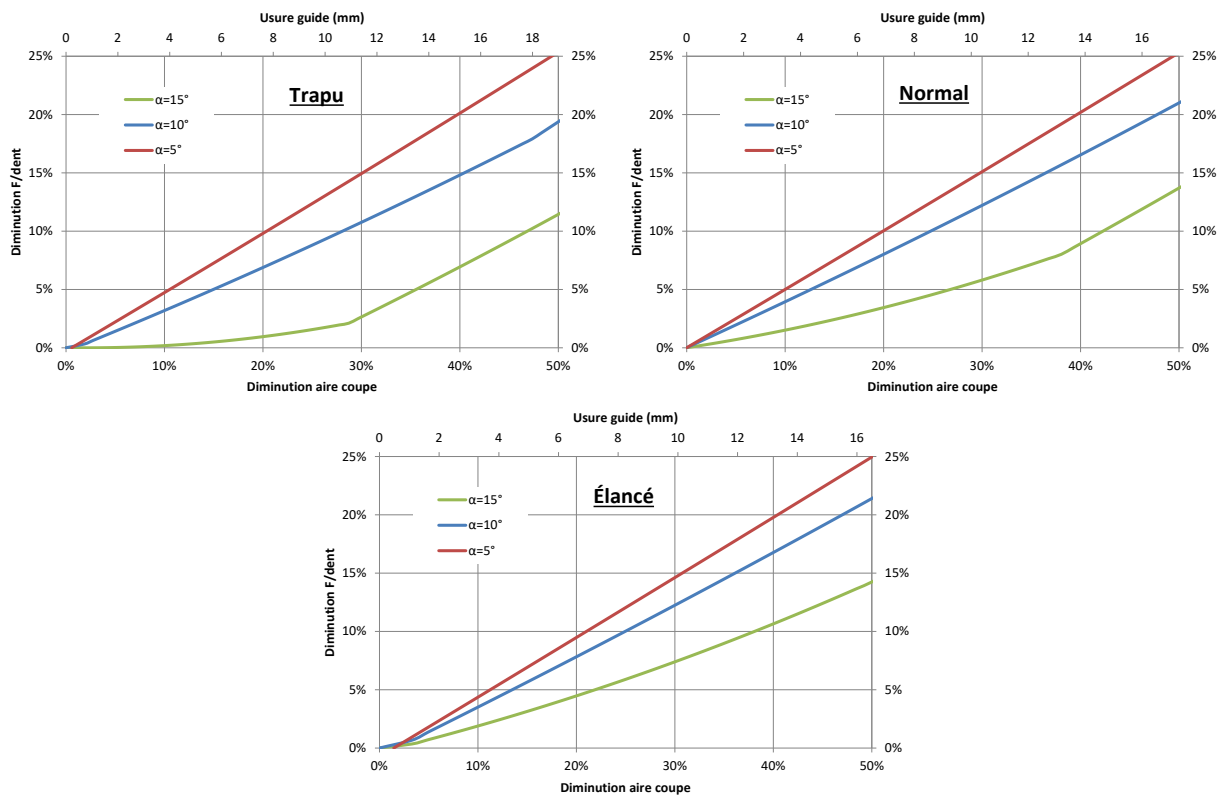
Lorsque le guide s'use, l'angle  $\theta$  augmente, donc  $x$  augmente et  $y$  diminue et l'on peut donc regarder comment se déplacent horizontalement les points B et C (profondeur d'enfoncement de la dent dans le guide).

La figure 25 montre que lorsque le guide s'use, la pénétration de la dent diminue aussi. Cependant on peut noter que la perte de pénétration diminue moins rapidement que l'usure du guide (7,5 mm de perte de pénétration pour 10 mm d'usure du guide pour une dent à géométrie « normale »). Plus le parachute est élancé, plus la pénétration de la dent diminue rapidement lorsque le guide est usé.



**Figure 25. Pénétration de la dent en fonction de l'usure du guide.**

En utilisant l'équation (4.7), on peut donc estimer la perte de force de freinage par dent en fonction de l'usure du guide. La figure 26 montre que, pour un angle  $\alpha$  positif, la perte de résistance est moins importante que la perte d'aire de coupe dans le guide. Ceci s'explique par le fait que l'usure du guide entraîne une rotation horaire du parachute, diminuant l'angle  $\alpha$  et augmentant la contrainte d'écrasement. Ainsi, la perte de section est en partie compensée par l'augmentation de la contrainte d'écrasement (ou résistance du bois). On note également que plus l'angle  $\alpha$  initial est faible, plus la perte de force de freinage par dent est importante. Enfin, plus le parachute est trapu, plus l'effet de l'angle  $\alpha$  initial est significatif.



**Figure 26. Diminution de la force de freinage par dent en fonction de l'aire de coupe.**

Le mécanisme de compensation est donc efficace pour une usure relativement limitée du guide, car les pertes d'efficacité sont inférieures à 15 % pour une usure de 10 mm.

### Impact d'un guide trop large sur la performance des parachutes

Pour un guide trop large [Figure 27], seul le point B est modifié par rapport à la figure précédente :

- Le triangle ABC est indéformable;
- Le point A est l'axe de rotation;
- Le point B est en contact avec le guide;
- Le point C est l'extrémité de la dent qui entaille le guide.

Les propriétés géométriques du triangle ABC et des angles identifiés à la figure 27 sont données au tableau 10. Le tableau 11 indique les coordonnées des points B et C dans un repère orthonormé, ayant pour origine A, en coordonnées polaires et cartésiennes.

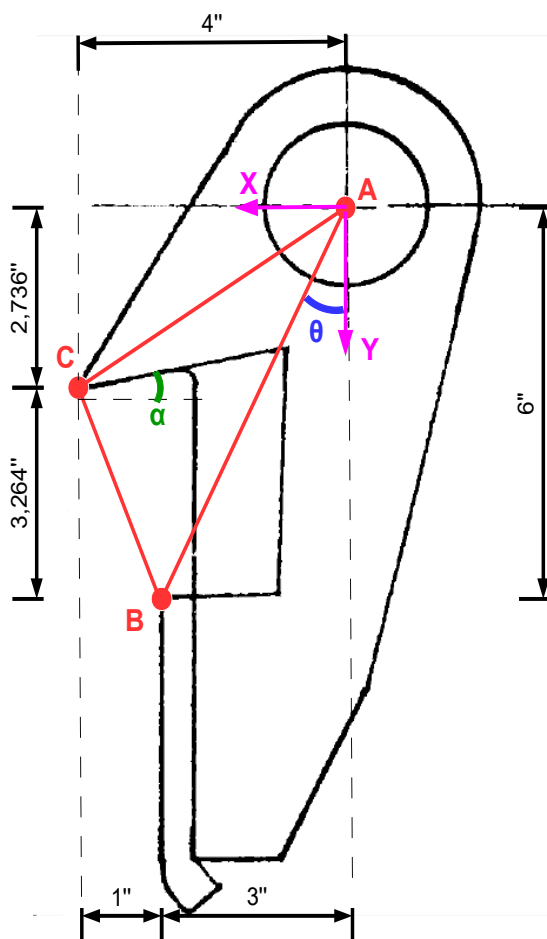


Figure 27. Parachute de type « Ontario », notations dans le cas où le guide est trop gros.

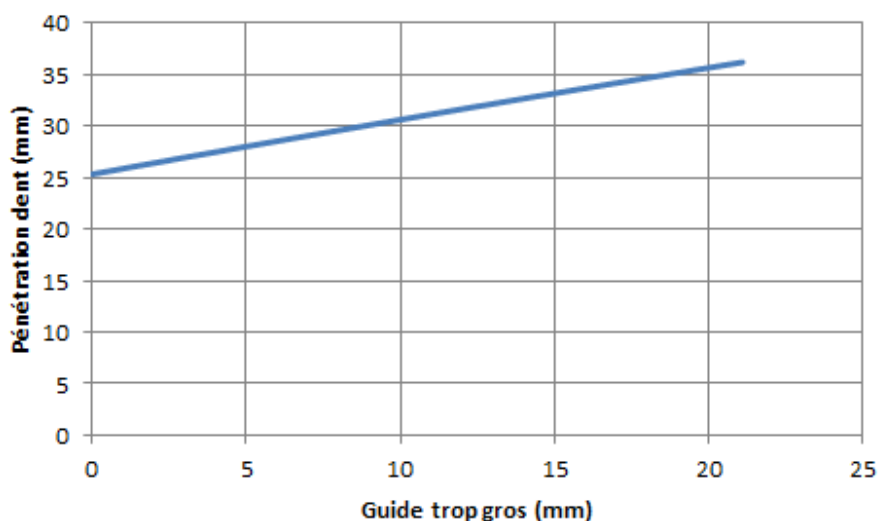
Tableau 10. Propriétés géométriques

Longueurs		Angles	
AB	6.71 po	$\hat{A}$	29.01°
BC	3.41 po	$\hat{B}$	107.37°
AC	4.85 po	$\hat{C}$	43.62°
		$\alpha$	10°
		$\theta$	26.57°

**Tableau 11. Coordonnées des points B et C**

	<b>B</b>	<b>C</b>
Coordonnées polaires	$\begin{cases} r = 6.71 \\ \theta = 26.57^\circ \end{cases}$	$\begin{cases} r = 4.85 \\ \theta = 55.6^\circ \end{cases}$
Coordonnées cartésiennes	$\begin{cases} x = 3 \\ y = 6 \end{cases}$	$\begin{cases} x = 4 \\ y = 2.736 \end{cases}$

Lorsque le guide est trop large, l'angle  $\theta$  diminue ce qui implique que  $x$  diminue et  $y$  augmente. La figure 28 montre que plus le guide est large, plus la pénétration de la dent augmente. Cependant on peut noter que la pénétration augmente moins rapidement que la largeur du guide augmente (+5 mm de pénétration pour un guide trop large de 10 mm).

**Figure 28. Pénétration de la dent en fonction du gonflement du guide.**

En utilisant l'équation (4.7), on peut donc estimer la variation de la force de freinage par dent lorsque le guide est plus large que sa valeur nominale<sup>23</sup>. La figure 29 montre que lorsque le guide est légèrement plus large (moins de 15 % de la largeur nominale), la force de freinage augmente pour un angle  $\alpha$  de 5° ou 10°. Ceci s'explique par le fait que la profondeur de coupe augmente. Au-delà de 15 % d'augmentation de la largeur pour un angle  $\alpha = 10^\circ$ , la force de freinage diminue jusqu'à un maximum de 12,2 %, car l'effet de l'augmentation de l'angle entraîne une diminution marquée de la contrainte d'écrasement  $\sigma_{cr}$  (et donc de la résistance du bois  $F$ ). Enfin, pour un angle  $\alpha$  de 15°, un guide trop large réduit la force de résistance par dent jusqu'à un maximum de 7,8 %.

<sup>23</sup> Lors de nos entretiens téléphoniques, un des répondants a mentionné la vérification du fonctionnement des parachutes avec mise de la cage sur les chaises, mais sans encoche dans les guides (donc déplacement partiel des dents). Un répondant a cité un cas de parachutes non fonctionnels dans une autre mine au drop test, mais fonctionnels à l'essai de chute libre : ils avaient été dimensionnés pour guides de 4" et les guides ont été changés par la suite et leur taille a été augmentée à 6".



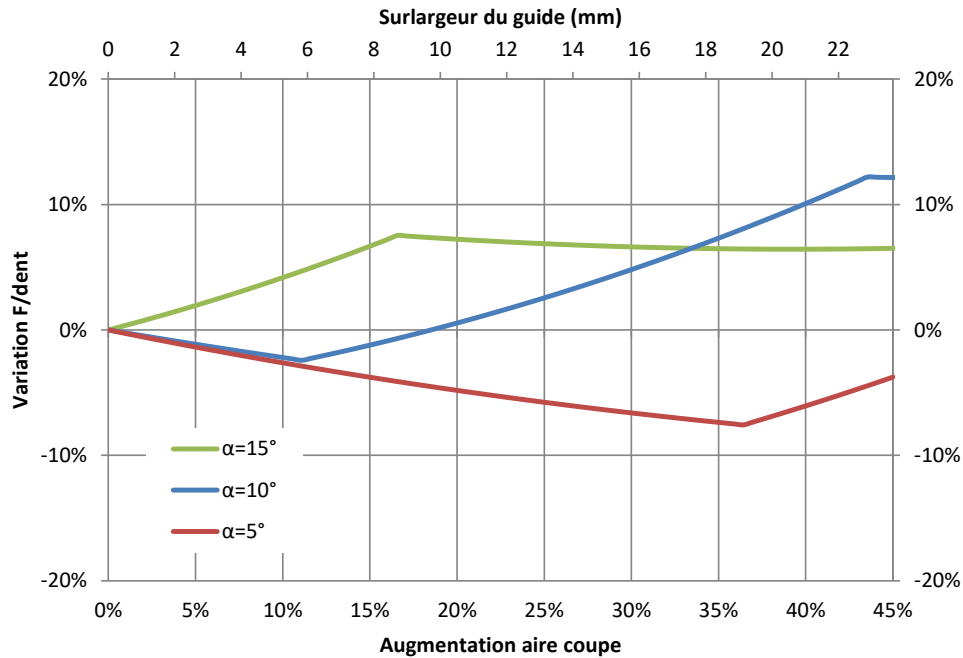


Figure 29. Variation de la force de freinage par dent ( $F_d$ ) en fonction de l'aire de coupe.

#### 4.2.4 Contribution du patin au freinage

Cette section vise à évaluer la contribution du patin au freinage du parachute de type « Ontario ». Le patin ne contribuera efficacement au freinage, par friction, que lorsque le guide fait exactement la largeur nominale pour laquelle les parachutes ont été conçus [Figure 30].

Dent stable, donc équilibre des moments autour du point A (rotule) :

$$\sum M_{/A} = F_d \times \left( 4.06 - \frac{1.015}{2} \right) - F_p \times \left( 10.125 - \frac{4.125}{2} \right) = 0 \quad (4.9)$$

Soit :

$$\sum M_{/A} = F_d \times 3.55 - F_p \times 8.06 = 0 \quad (4.10)$$

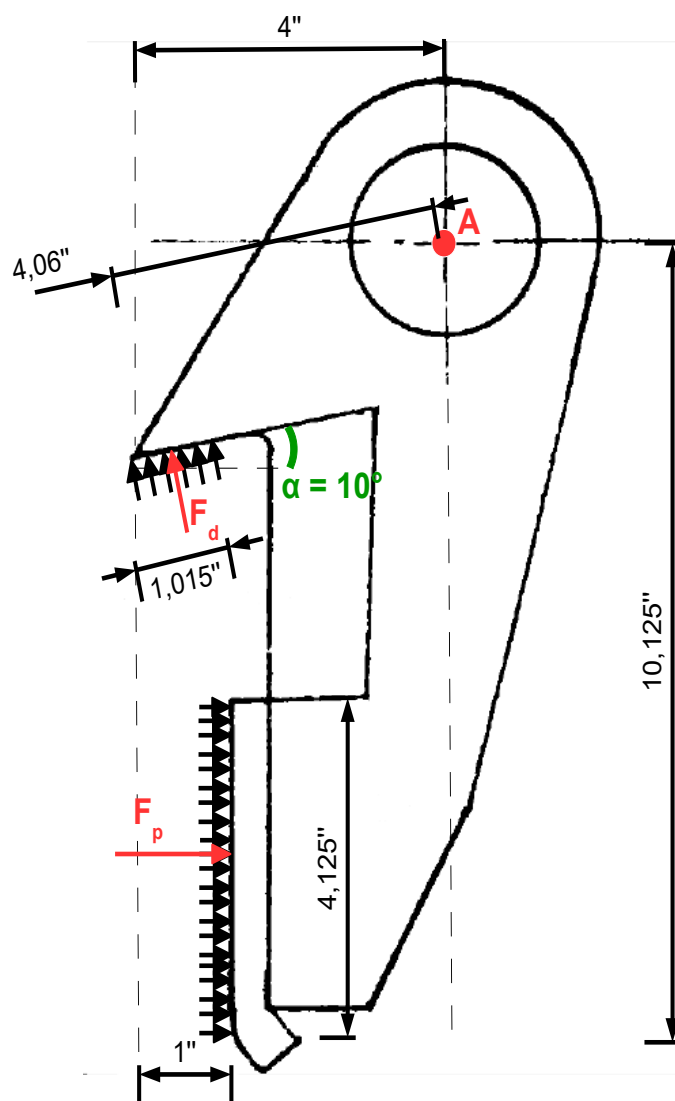
Et :

$$F_p = \frac{F_d \times 3.55}{8.06} = 0.44 F_d \quad (4.11)$$

Force de freinage (parachute à 4 dents) :

$$F_{tot} = 4F_d + 4F_p C_f = 4(F_d + 0.44F_d C_f) = 4(F_d + 0.088F_d) \quad (4.12)$$

En prenant la valeur  $C_f = 0.2$  pour le coefficient de friction cinématique bois/acier  $C_f$ .



**Figure 30.** Parachute de type « Ontario », notations pour le calcul de la contribution au freinage du patin.

Ainsi la contribution du patin au freinage est de l'ordre de 8 % dans le cas optimal où le guide a exactement la largeur nominale. Dès que le guide est usé ou trop large, le contact entre le patin et le guide va se limiter à un point, réduisant fortement la force de freinage du patin.

### 4.3 Compilation de résultats d'essais

#### 4.3.1 Sources de résultats d'essais

Il nous est apparu pertinent de compiler les différents essais de chutes libres disponibles dans la littérature et dans les entreprises [Tableau 12] afin de les comparer sur un même graphique. Pour cela nous avons sélectionné plusieurs sources différentes de données compatibles sur une période allant de 1947 à nos jours.

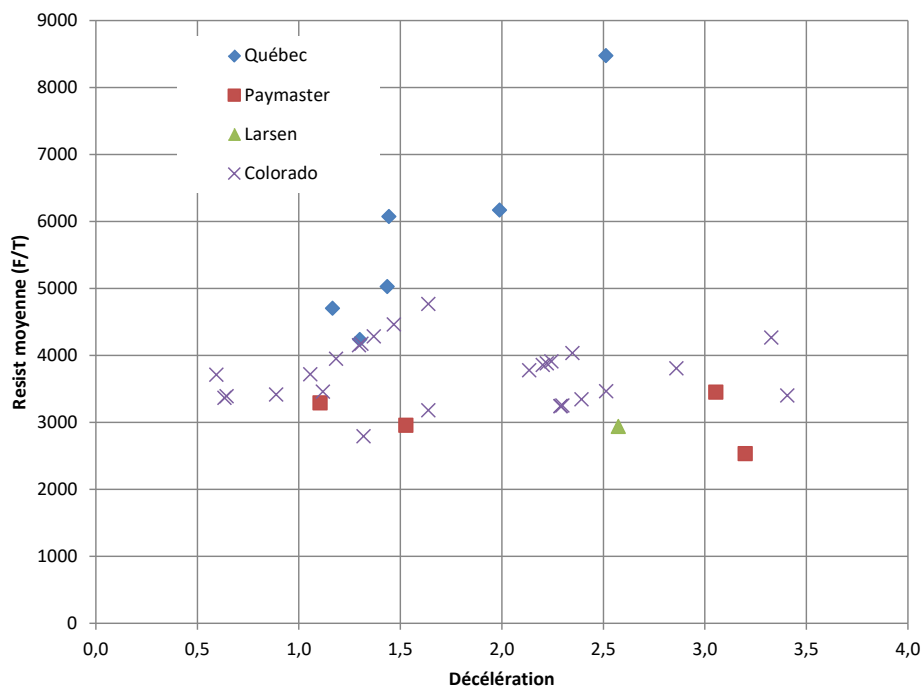
**Tableau 12. Résultats d'essais de chute libre utilisés**

Source de résultats d'essais	Nombre de résultats exploitables	Dénomination dans cette section
Mines québécoises (cages actuellement en service)	6	Québec
Rapport post Paymaster (Young, 1947)	4	Paymaster
Rapport (Larsen <i>et al.</i> , 1972)	1	Larsen
Rapport Colorado School of Mines (Penning <i>et al.</i> , 1980)	27	Colorado

Les essais de la *Colorado School of Mines* sont faits avec des parachutes dont la profondeur de coupe est constante ( $P = 1$  po), avec une largeur  $L$  variant de 1,5 à 2,25 po et un angle de la dent constant  $\alpha = 80^\circ$ . L'essence de bois utilisée pour les guides est le *Keruing* (un bois dur originaire d'Asie du Sud-Est).

#### 4.3.2 Comparaison des résultats d'essais et discussion

Quelle que soit l'essence de bois utilisée, que le bois soit humide ou non, avec des dents de dimensions différentes, mais voisines et pour des vitesses de chute différentes, on obtient grosso modo une force de freinage moyenne située entre 3000 et 5000 lb/po<sup>2</sup> [Figure 31]. Ces valeurs sont cohérentes avec la valeur de  $F = 4500$  lb/po<sup>2</sup> utilisée dans le rapport de Barry (1982), valeur basée sur « plusieurs années de récolte de résultats empiriques » pour un angle  $\beta$  de  $85^\circ$  et un taux d'humidité de 40 %.



**Figure 31. Résistance moyenne (F/T) en fonction de la décélération.**

Selon des données fournies par Wabi, le rapport de Barry (1982) donne les valeurs suivantes pour les résistances moyennes du bois [Tableau 13] (plus  $\beta$  est grand, plus F est grand).

**Tableau 13. Résistance moyenne du bois en fonction de l'angle  $\beta$  et de l'humidité**

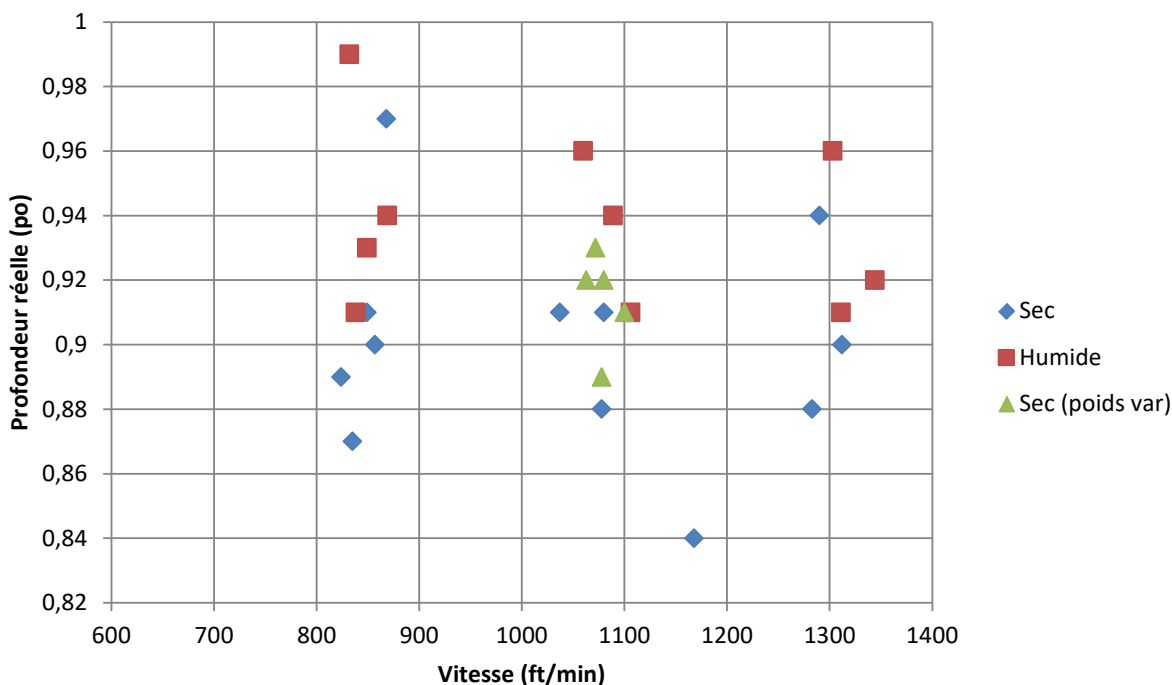
Angle $\beta$ (°)	F (lb/po <sup>2</sup> )	
	Taux humidité 40 %	Taux humidité 75 %
85	4500	2900
86	4600	3000
87	4700	3100
88	4800	3200
89	4900	3300

Le tableau 14 donne les valeurs mesurées pour les résistances de bois dans les mines en service en Ontario (depuis les années 1940). On remarque que le BC Fir (*Douglas fir*) présente la plus grande variabilité. La majorité des valeurs de résistance moyenne du bois se trouve entre 3000 et 5000 lb/po<sup>2</sup> (Guse, 2014). Le Karri et le Parallam semblent présenter plus de constance dans les résultats d'essais, cependant, le nombre de valeurs mesurées est nettement plus faible (respectivement 12 et 5 contre 202). Par ailleurs, les valeurs indiquées par Guse ne tiennent compte, ni de l'humidité, ni de l'angle de la dent, ni même du type de *safety dog* (dans les années 1940, tous les parachutes n'étaient pas nécessairement de type « Ontario » [Figure 17]).

**Tableau 14. Résistance moyenne du bois, mesures effectuées en Ontario**  
(Guse, 2014)

Résistance moyenne du bois (lb/po <sup>2</sup> )			
Essence de bois	Douglas Fir	Karri	Parallam
Nombre de tests	202	12	5
Minimum	1,501	2,995	2,538
Maximum	8,130	5,553	3,460
Ratio Max:Min	5.4	1.9	1.4
Moyenne	3,803	4,180	3,078
Écart-type	1,240	845	396

La figure 32 présente la profondeur réelle de pénétration des dents dans le bois en fonction de la condition des guides (sec ou humide) et de la vitesse de l'essai. La plupart du temps, quand le bois est humide, la dent s'enfonce plus, mais il y a quelques exceptions. Par contre, la pénétration de la dent dans le bois ne semble pas liée à la vitesse de chute libre lors de l'essai. Pour les carrés rouges et losanges bleus, le poids de la cage est fixe et la vitesse varie. Pour les triangles verts, la vitesse est fixe et le poids de la cage variable.



**Figure 32. Profondeur réelle d'engagement des dents (1 po nominal) en fonction de la vitesse de chute libre.**

**Tableau 15. Moyennes et écarts-types pour la profondeur de pénétration des dents en fonction de la vitesse et de l'hygrométrie du bois**

	Vitesse d'extraction					
	800 pi/min		1000 pi/min		1250 pi/min	
	Sec	Humide	Sec	Humide	Sec	Humide
Profondeur moyenne (po)	0,908	0,943	0,885	0,937	0,907	0,930
Écart-type	0,038	0,034	0,033	0,025	0,031	0,026

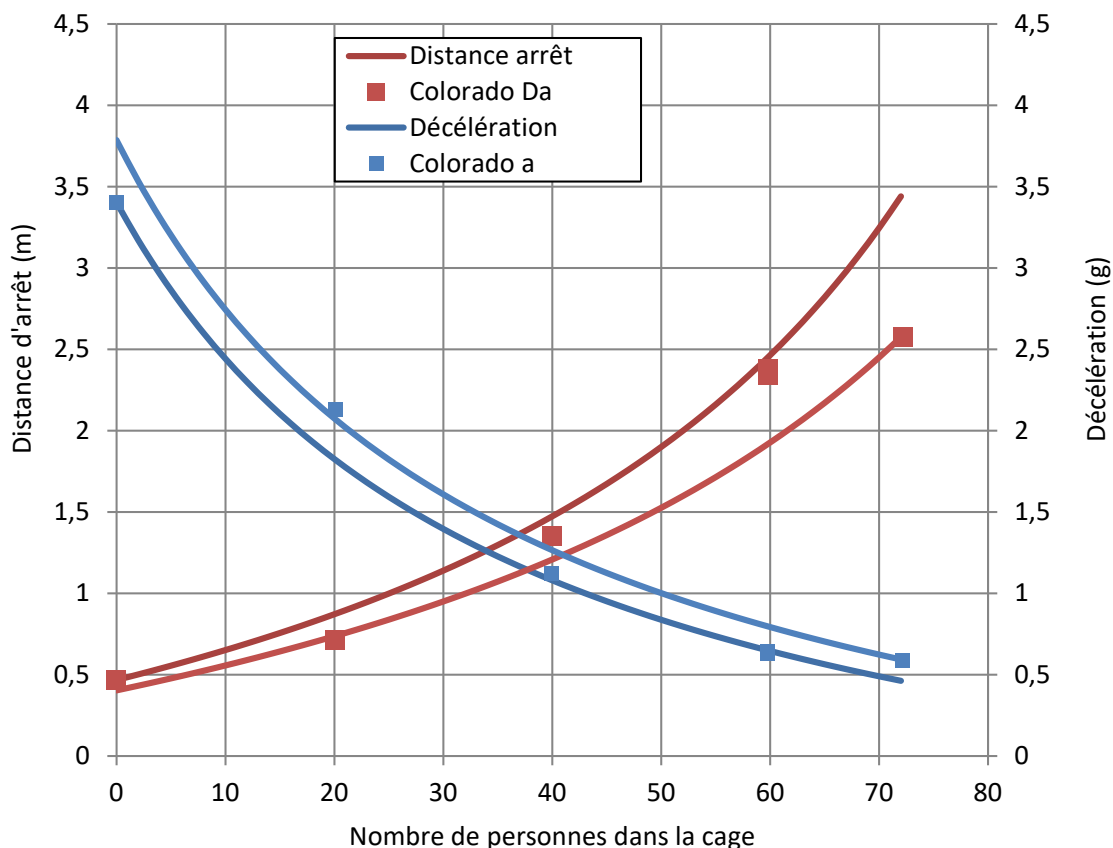
Nous allons prendre comme hypothèse dans la suite du raisonnement que la force de freinage est, pour une géométrie de dents donnée, indépendante ou quasi indépendante de la vitesse de la cage et du chargement.

La figure 33 présente la distance d'arrêt et la décélération calculées en considérant la force de freinage ( $F$ ), ou la résistance moyenne des guides, constante durant toute la phase de freinage de la cage. Pour chaque paramètre, décélération et distance d'arrêt, deux courbes sont calculées :

Une en partant des mesures obtenues avec la cage vide ( $F = 30\,606$  lbs – distance d'arrêt de 0,5 m et décélération de 3,4 g) et

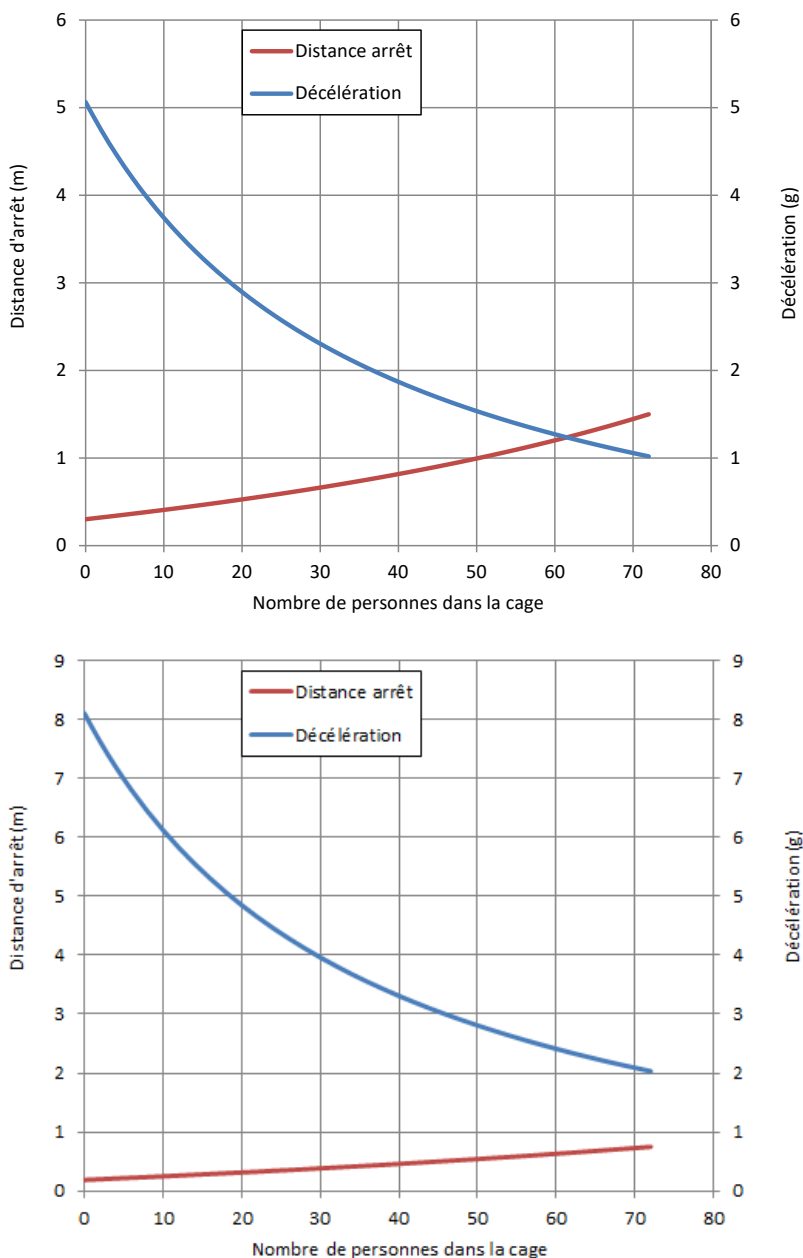
Une en partant des mesures effectuées avec la cage à pleine charge ( $F = 33\,390$  lbs – distance d'arrêt de 2,6 m et décélération de 0,6 g).

Les courbes théoriques enveloppent les résultats disponibles du rapport de (Penning *et al.*, 1980). Ainsi, en considérant que la force de freinage est indépendante, ou quasi indépendante, de la vitesse de la cage et de la charge, il est possible de déterminer avec une faible marge d'erreur la décélération que subiront les occupants d'une cage, quel que soit leur nombre, à partir d'un test de chute libre effectué à faible vitesse et à faible charge. Par exemple, un test effectué sur une cage à vide avec une distance de chute libre d'environ 1 m peut suffire. McIvor (1996) arrivait aux mêmes conclusions.



**Figure 33. Décélération et distance d'arrêt en fonction du nombre d'occupants dans la cage.**

La figure 33 montre aussi que le système parachute de la cage utilisé par Penning *et al.* aurait été rejeté dans la plupart des provinces canadiennes, car, à pleine charge, la valeur de l'accélération est inférieure à 0,9 g. Cependant, si seulement un travailleur est présent dans la cage, la décélération « à vide » est égale à 3,4 g. Enfin, la figure 34 montre, par calcul, qu'en imposant à un système de parachute d'engendrer une décélération de 1 g (2 g) à pleine charge pour la même cage ( $F = 42\,304$  lbs), ceci entraîne une décélération de la cage de l'ordre de 5 g (8 g) lorsque seulement un ou deux travailleurs sont présents.



**Figure 34. Décélération et distance d'arrêt en fonction du nombre d'occupants dans la cage (en imposant  $a = 1g$  ou  $2g$  à cage pleine).**

Avec les puits de plus en plus profonds et avec l'augmentation de la performance des câbles, on observe une tendance à l'allègement des cages ou à l'augmentation du ratio « nombre maximum de travailleurs / poids de la cage ». Ces deux tendances amplifient le phénomène illustré dans la figure 34. De plus, comme la majorité des législations au Canada impose une valeur de décélération minimale à pleine charge, cela peut entraîner des décélération supérieures à 5 g à vide (pour les cages de grand volume), décélération qui pourraient engendrer des blessures aux travailleurs lors de l'arrêt de la cage.



#### 4.4 Arbre de défaillance

La partie de l'arbre de défaillance (AdD) [Annexe VI] discutée dans cette section est seulement la branche « Non-arrêt autonome de la cage ». Pour cette branche on compte :

1. un évènement élémentaire lié à l'absence de parachute (C1);
2. six évènements élémentaires liés aux dysfonctionnements du mécanisme du parachute (A1, B1, E1, E2, E6, E7, E8);
3. trois évènements élémentaires liés au non-déclenchement du mécanisme (E3, E4, E5);
4. onze évènements élémentaires liés aux dysfonctionnements du couple dents / guides (A2, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B10, B11);
5. deux évènements élémentaires liés à une énergie cinétique trop grande de la cage (A3, A4).

#### Amélioration des parachutes actuels et effets sur l'AdD

L'arbre de défaillance a été créé sans tenir compte des caractéristiques précises des différentes composantes d'un parachute traditionnel. De ce fait, l'utilisation de dents type « Ontario » à la place de dents sans spécification permet de supprimer trois évènements élémentaires (A1, B5, B8) sur les 48 possibles (Tableau 16). Un quatrième évènement élémentaire est supprimé (C1) si l'on tient compte de l'obligation réglementaire d'utiliser des parachutes, soit 8 % des causes élémentaires.

Les données disponibles dans la littérature (Larsen *et al.*, 1972) et des données recueillies auprès des mines québécoises nous indiquent que les distances de freinage sont courtes. Il y a donc peu de possibilités d'effets de traînée de câble qui pourrait limiter le déclenchement. De plus, comme les ressorts sont généralement tarés entre 30 % et 70 % de la cage à vide (Fortin et Demers, 2011; Larsen *et al.*, 1972), cela réduit la possibilité du non-déclenchement du parachute par effet de traînée de câble et permet d'éliminer temporairement l'évènement élémentaire (E4). Nous verrons par contre plus loin d'autres arguments en défaveur de cette élimination. Cependant, pour supprimer totalement la possibilité du relâchement temporaire du parachute, seul un dispositif mécanique de blocage des dents en position enclenchée (*anti-trailing rope mechanism*) peut jouer ce rôle. L'existence de ce dispositif permet alors d'éliminer le sous-arbre A (composé des éléments E3, E4 et E5) tout en réduisant l'occurrence d'apparition de deux évènements élémentaires (E3 et E5).

Le retour d'expérience acquis depuis l'accident de Paymaster conjugué aux tests réglementaires sur les parachutes et au nombre limité de fournisseurs de parachute permet d'éliminer six évènements élémentaires que sont (A2, B2, E1, E2, E7, F1).

De plus, l'évènement élémentaire (A3) pourrait être éliminé si le dégagement sous le dernier niveau des puits était supérieur à la plus grande distance de freinage possible dans les conditions les moins favorables (vitesse descendante et poids maximaux).

**Tableau 16. Liste des évènements élémentaires supprimés en lien avec les parachutes et explications**

Évènements	Explications
A1, B5, B8	Dent Ontario
C1	Réglementation
A2, B2, E1, E2, E7, F1	Géométrie semblable des dispositifs (retour d'expérience) et tests réglementaires de chute libre
A3	Le dégagement sous le dernier niveau est supérieur à la plus grande distance de freinage de la cage
E4	Le ressort est généralement taré entre 30 % et 70 % du poids à vide de la cage
E3, E5	Dispositif anti-traîne de câble

Pour les autres évènements élémentaires, les moyens de réduction du risque peuvent être techniques ou procéduraux comme le montre le tableau 17. Après analyse, il appert que la quasi-totalité des moyens de réduction du risque sont procéduraux, excepté pour les quatre évènements (A4, B1, E3, E5) qui intègrent des éléments techniques indépendants.

La non-adéquation du couple dents/guide génère la quasi-totalité des évènements élémentaires (9/11 – B1, B2, B3, B4, B6, B7, B9, B10, B11) qui peuvent entraîner un freinage limité voire quasi nul du parachute. La réduction du risque d'apparition d'un évènement élémentaire repose autant sur des procédures d'examen visuels (4 évènements – B3, B4, B9 et B10) appliquées en vertu des articles 327 ou 395 du RSSM, que sur les essais de dégagement rapide (4 évènements – B1, B6, B7 et B11).

L'utilisation des chaises est le seul moyen procédural qui empêche totalement la chute de la cage, dans la mesure où les chaises sont fiables.

Les évènements élémentaires (E3) et (E5) peuvent être contrôlés par une augmentation de la force du ressort. Cependant, la réduction du poids des cages entraîne de facto une réduction de la force du ressort, car celui-ci est taré selon un pourcentage fixe du poids de la cage. De ce fait, plus une cage sera légère et plus le ressort sera faiblement taré par rapport au poids de la cage, plus les probabilités d'apparition des évènements élémentaires (E3) et (E5) seront grands. De plus, l'augmentation de la profondeur des puits augmente la probabilité d'un effet de traînée de câble compte tenu de l'allongement de la longueur des câbles et du positionnement aléatoire du point de rupture du câble. Ces deux tendances, allègement des cages et augmentation des profondeurs des puits, font que la probabilité d'apparition des évènements élémentaires (E3) et (E5) ne diminuent pas, voire augmentent. De fait, même si (E4) est éliminé, (E3) et (E5) ne le sont pas.

Enfin, les évènements élémentaires (E6) et (E8) peuvent être contrôlés par des procédures d'exploitation alors que les évènements élémentaires (F2) et (F3) le sont par des procédures de maintenance appliquées en vertu des articles 299, 302, 305 du RSSM et de l'annexe V.

**Tableau 17. Moyens de réduction du risque pour les événements élémentaires restants**

	Technique	Procéduraux				
		Inspection visuelle	Procédure d'exploitation	Procédure de maintenance	Essai de dégagement rapide	Dispositions réglementaires autres
A4	Régulateur de vitesse (machine d'extraction)					Articles 232, 241, 242
B1	Encoches dans les guides à la recette	X			X	
B3		X				Article 395
B4		X				Article 395
B6					X	
B7		X			X	Article 327
B9		X				Article 395
B10		X				Article 395
B11					X	
D1			X	X		
E3	Tension du ressort					
E5	Tension du ressort					
E6		X	X			
E8		X	X			
F2		X		X		Articles 299, 302, annexe V du RSSM
F3		X		X		Article 305

#### 4.5 Synthèse et recommandations

Les parachutes traditionnels présentent des limitations fonctionnelles (ils ne sont compatibles qu'avec des guides en bois) et sont loin d'être parfaits, car la décélération avec une cage presque vide est souvent importante. Néanmoins, il s'agit d'un système de sécurité qui a fait ses preuves au cours des décennies, particulièrement depuis les améliorations apportées à la suite de l'accident de Paymaster. Ce chapitre a montré comment il était possible d'estimer, et d'ajuster dans une certaine mesure, la décélération subie par les travailleurs, en fonction de la géométrie des dents.

Outre le respect des réglementations provinciales, l'objectif des concepteurs de parachutes devrait être de limiter au maximum la décélération de la cage sans toutefois obtenir des distances de freinage trop importantes permettant un effet néfaste de la traînée du câble. Or, l'essai de chute libre est fait à capacité de charge maximale, ce qui implique que la décélération obtenue lors de l'arrêt d'une cage presque vide sera plus importante. Comme cela est souligné

précédemment (Giraud et Galy, 2022), le Québec est une des rares provinces qui ne prescrit pas d'intervalle de décélération limite. Ceci est un avantage pour les cages de grande capacité modernes. De même, pour la cage testée à la *Colorado School of Mines*, une décélération inférieure à 0,9 g à pleine charge n'est pas un mauvais résultat. Par contre, une limite maximale de décélération pourrait être un ajout intéressant au RSSM compte tenu de l'allègement des cages au fur et à mesure de l'augmentation de la profondeur des puits de mine.

Bien que les parachutes de type « Ontario » soient pourvus d'un système de compensation de l'usure, une usure trop marquée des guides conduit à une perte d'efficacité du freinage. En conséquence, l'usure des guides en bois est un paramètre qui doit être surveillé étroitement tout comme la position des dents par rapport aux guides<sup>24</sup>. Enfin, il faut veiller, dans la mesure du possible, à ne pas mélanger les essences de bois des guides dans un même puits. Si cela ne peut pas être respecté, il faut impérativement que les portions de guides en vis-à-vis soient d'essence identique afin de garantir le plus possible un freinage symétrique de la cage.

## Recommandations

Afin d'améliorer la performance des parachutes traditionnels, nous formulons les recommandations suivantes. Il appartiendra au législateur de considérer si tout ou partie de ces recommandations doivent être intégrés dans les textes de loi, et aux industriels de mettre en place certaines de ces recommandations s'ils les jugent pertinentes. Les recommandations sont présentées en ordre séquentiel sans organisation par niveau d'importance, mais en suivant le plan de présentation de la section.

Recommandation 4.1 :

Définir une limite supérieure de décélération pour une cage « à vide » (avec 1 ou 2 travailleurs).

Recommandation 4.2 :

Définir une longueur maximale de freinage pour une cage à pleine charge et pour une survitesse de 20 % par rapport à la vitesse maximale d'opération. En tirer une hauteur de dégagement minimale en fond de puits.

Recommandation 4.3 :

Bien vérifier lors des inspections mensuelles du boisage du puits les différents paramètres liés aux guides qui influencent la force de freinage du parachute dont :

- L'usure des guides qui influence la profondeur d'engagement des dents (événements B4, B7, B9, B10, B11 de l'arbre de défaillance);
- Les dimensions nominales des guides par rapport aux spécifications du parachute (B6);
- La bonne position latérale des dents / guides sur toute la hauteur du puits afin que l'engagement des dents se fasse le plus possible vers le centre des guides (événements B4 et B9 de l'arbre de défaillance);

---

<sup>24</sup> Lors de nos entretiens téléphoniques, un répondant a mentionné que l'expérience des inspecteurs du puits n'était pas connue dans un cas (plusieurs personnes qui se relaient). Pour une autre mine du Québec, il y a deux préposés au puits. Ceux-ci ont plus de 30 ans d'expérience et sont tous les deux des anciens "shaftmen". Chaque semaine lors de l'inspection du puits, les préposés au puits vérifient l'espacement entre les guides à l'aide d'un gabarit d'aluminium. Cette pratique a aussi été mentionnée pour une autre mine.

- La qualité des guides et leur alignement (événements B3 et B9 de l'arbre de défaillance).

Recommandation 4.4 :

Limiter l'usure des guides à ½ pouce (12 mm), sur chaque face.

Recommandation 4.5 :

Toujours avoir les sections de guides en vis-à-vis de la même essence de bois (idéalement avoir la même essence de bois pour toute la hauteur du puits).

Recommandation 4.6 :

Faire des essais de laboratoire sur des guides en bois prélevés dans des puits en service (ou récemment fermés), afin de caractériser précisément leurs propriétés mécaniques : résistance, taux d'humidité, etc.

Recommandation 4.7 :

Définir un intervalle de pourcentage réglementaire pour le tarage du ressort déclencheur des parachutes et étudier l'effet de l'allègement des cages et de l'allongement des câbles sur les effets de traînée de câble.

Recommandation 4.8 :

Qu'un organisme collige de manière systématique tous les essais de chute libre pour toutes les cages en service au Québec et conserve ces documents même après le démantèlement d'une mine, afin de bâtir une base de données complète et à jour, qui pourra être utilisée (i) à des fins statistiques, (ii) à des fins de recherche (si désiré) dans l'optique d'améliorer la sécurité des transporteurs miniers.



## 5. PARACHUTES MODERNES

### 5.1 Le passage des guides en bois aux guides en acier

Traditionnellement les guides sont 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). Des essais ont également été effectués sur du *parallam wood* (manufacturé) : ce matériau très homogène présente un bon comportement lors des tests, il faudrait vérifier *in situ* s'il ne se dégrade pas trop avec l'humidité ambiante (McIvor, 1996).

La limitation principale des parachutes traditionnels est qu'ils ont été conçus pour être utilisés avec des guides en bois. En effet, leur principe de fonctionnement, des dents qui entaillent le guide, les rend incompatibles tels quels avec des guides en acier. 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). L'utilisation de guides en acier permettrait de ne plus être limité par les contraintes du bois, mais il faudrait alors s'orienter vers un nouveau système de parachute. Outre leurs avantages listés ci-dessous, les guides en acier permettent d'épargner l'abattage d'arbres parfois centenaires et de grande hauteur (Morrison, 2009).

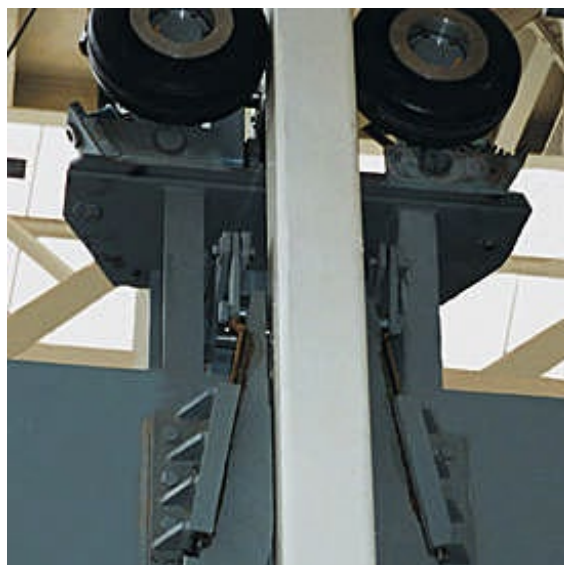
Les guides en acier présentent de nombreux avantages (du Preez et Hill, 2010) :

- Transporteurs de plus grand poids;
- Vitesse d'extraction plus élevée;
- Moins cher que le bois;
- Plus facile d'entretien;
- Pas de risque de gonflement;
- Moins de risque d'usure.

Pour l'instant, au Québec, une seule mine a installé des guides en acier. Ce choix exclut d'office l'utilisation des parachutes conventionnels. Deux types de parachutes modernes peuvent alors être utilisés : ceux avec des coins d'écartement ou ceux avec des pinces hydrauliques. Dans le second type, il y a au Canada *a priori* deux systèmes disponibles et capables de répondre à la double contrainte de l'utilisation de guides en acier et à la nécessité d'un système parachute.

### 5.2 Les parachutes à coin d'écartement

Les « *friction wedge shoes* » (système de frein à coin d'écartement) illustrés à la figure 35 sont un système de freinage d'urgence fonctionnel sur des guides en acier. Par contre, le contrôle de la décélération est impossible : on a des décélérations de l'ordre de 10 g pour une cage vide (du Preez et Hill, 2010). Par ailleurs, ce type de système de frein est limité en termes de poids qu'il peut arrêter. Par conséquent, ce système ne peut être retenu pour l'instant.



**Figure 35. Friction wedge shoes.**

De « Emergency braking system for the use with steel mine shaft guides », par A. du Preez et S. Hill, 2010, *Hoist & haul 2010: Proceedings of the International Conference on Hoisting and Haulage*, page 4. ©SME, 2010. Reproduit avec permission.

### 5.3 Système évolué #1

Sur une période de 18 ans, entre 1983 et 2001, le Ministère du Travail de l'Ontario (Wedzicha, 2002) a répertorié 44 incidents impliquant l'application des parachutes, soit :

- douze incidents avec activation des parachutes qui ont empêché la chute de la cage;
- dix applications non souhaitées des parachutes (déclenchement intempestif);
- vingt-deux incidents avec application des parachutes à la suite d'un freinage trop important (effet yoyo).

Du Preez et Hill (2010) s'appuient sur ces statistiques pour souligner le fait que le nombre d'applications non souhaitées des parachutes traditionnels est élevé et qu'il faut remédier à ce problème avec un système évolué. Parmi les avantages de ce système évolué (et plus généralement de ce type de système), on peut citer (Gorzalczynski, 2002) : (i) décider quand activer le frein d'urgence, et (ii) ajuster la force de freinage (en ajustant la pression sur les pinces).



### 5.3.1 Du système de base au système évolué

Le système de base, communément utilisé dans les mines à travers le monde, est principalement destiné à faire du positionnement (*chairing*) et sert ainsi à éviter les mouvements verticaux du transporteur lors des phases de chargement ou déchargement. Le système évolué reprend le système de base, en y ajoutant un accumulateur qui permet d'appliquer les pinces en cas d'urgence. Il inclut également des dispositifs de surveillance de la tension dans le câble. Ce système évolué est à l'heure actuelle installé sur seulement quelques cages dans le monde. Il y a pour l'instant peu de données disponibles sur son fonctionnement *in situ*.

L'intérêt principal de ce système fonctionnant sur guides en acier est le contrôle possible de la décélération de la cage (Kotze, 2014).

Le mécanisme d'activation est laissé au choix du client (du Preez et Hill, 2010) :

- Mécanique avec un ressort hélicoïdal : si le câble casse, le système est activé. Possibilité de rajouter un amortisseur pour retarder l'activation du système afin d'éviter l'application intempestive du parachute. On a ici un système de déclenchement assez rustique, proche des parachutes traditionnels;
- Électronique (PLC) avec le choix des paramètres de déclenchement : cellule de charge sur l'attache, vitesse du transporteur, accéléromètre, perte de communication avec le câble, capteurs de position dans le puits. Le système est activé quand au moins deux de ces signaux indiquent une condition d'urgence (toujours pour minimiser le risque d'application intempestive).

Le fonctionnement du système évolué est le suivant (Lunderstedt *et al.*, 2012) :

- Les accumulateurs sont chargés durant l'opération normale du système de base (positionnement) afin d'être fonctionnels en tout temps (Kotze, 2014);
- La pression des accumulateurs est interverrouillée avec le circuit de la machine d'extraction de manière à ce que celle-ci ne puisse fonctionner que lorsque la pression est suffisante dans les accumulateurs;
- Lorsque le câble est rompu (ou que la tension du câble est trop faible), les pinces sont activées par la pression des accumulateurs;
- Les pinces arrêtent la chute de la cage en serrant les guides;
- La cage reste en place aussi longtemps que nécessaire pour effectuer les opérations de sauvetage.

L'inspection quotidienne du dispositif dure environ 5 à 10 minutes et comprend : une activation du système à l'aide des valves d'activation, la vérification de la pression des pinces et de l'accumulateur, et la vérification de l'absence de fuite (Lunderstedt *et al.*, 2012). Les accumulateurs sont chargés à nouveau et le système est prêt à l'emploi. Le fabricant recommande un reconditionnement des pinces tous les deux ans. Les documents rendus disponibles par le fabricant indiquent que les pinces sont calculées avec un facteur de sécurité de 2, permettant ainsi à une pince de retenir la cage si la seconde pince est défaillante. Enfin, il faut procéder à un changement quotidien des batteries.

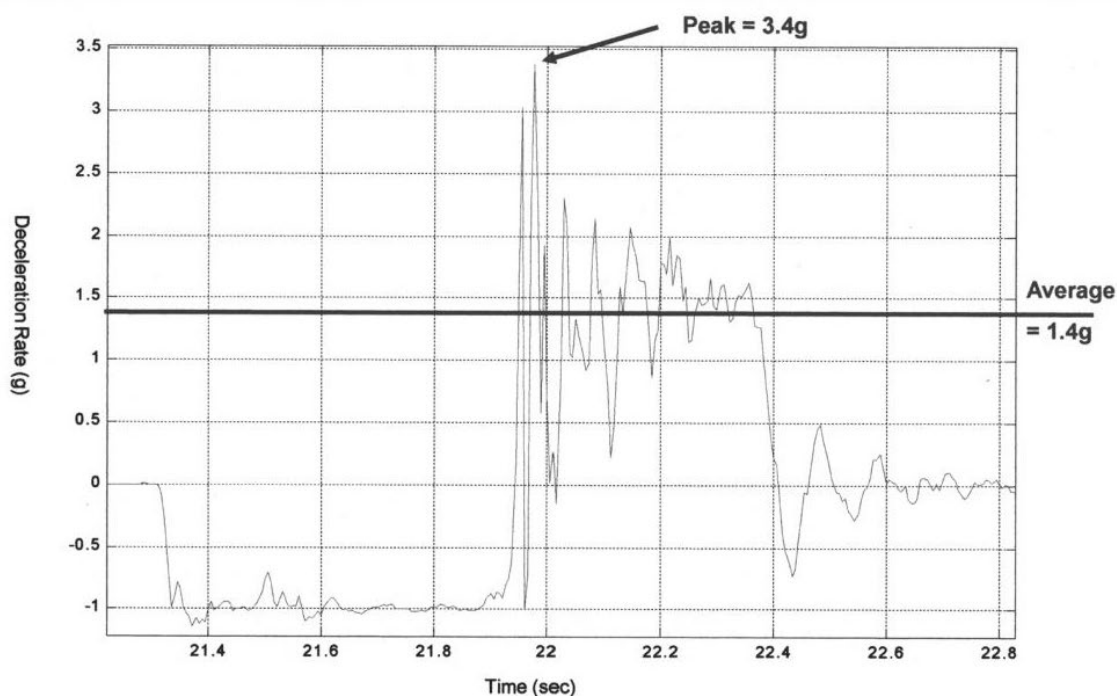
Pour transformer un système de base en système évolué, il faut rajouter quelques éléments dans le système hydraulique : un accumulateur, un clapet antiretour pour son remplissage, un capteur de pression (pour vérifier que la pression de l'accumulateur est suffisante avant d'autoriser tout mouvement de la cage) et un distributeur 3/2 servant d'interrupteur.

En cas de signal de déclenchement, le tiroir du distributeur 3/2 va se décaler et l'accumulateur du circuit hydraulique va se vider dans le circuit, forçant ainsi l'application des pinces sur les guides. Le signal de déclenchement peut être activé par un ressort ou par un PLC comme discuté précédemment. Le ressort a l'avantage de la simplicité (comme les parachutes traditionnels), le PLC présente d'autres avantages : utilisation de deux signaux pour limiter l'activation intempestive, possibilité de déclencher le système évolué depuis un bouton d'arrêt d'urgence placé dans la cage. Sur certains schémas, un régulateur de débit réglable permet de contrôler la vitesse d'application des pinces sur les guides, et donc de contrôler le début de la décélération de la cage. Enfin, une valve permet de rétracter les pinces une fois que la situation d'urgence a été réglée.

Un système évolué déclenché électroniquement comprend un dispositif électronique de prise de décision, *a priori* avec plusieurs paramètres, ainsi qu'un système de communication radio. Ce système de communication permet d'envoyer en surface des informations : mou de câble, pression de l'accumulateur, activation ou défaillance du système évolué, etc.

### **5.3.2 Performance du système évolué**

Un essai de « chute libre » a été fait avec ce système en Ontario sur un banc de tests (Lunderstedt *et al.*, 2012). Les critères réglementaires de l'essai de chute libre (R-ON, 2013) n'ont pas été respectés : la cage était vide lors de l'essai, ce qui représente le cas où les décélérations seront les plus importantes (Anon, 2012a). La décélération moyenne de la cage était de 1.4 g, soit dans les valeurs limites de l'Ontario (entre 0.9 g et 2 g). Il faut cependant noter que la décélération maximale est montée jusqu'à plus de 3 g [Figure 36]. Le fabricant prévoit de réaliser des tests à pleine charge sur une structure de 30 m actuellement en construction dans leurs installations en Afrique du Sud (Morrisson, 2013). Actuellement, le fabricant annonce un total de 100 *drop tests* effectués et l'obtention d'une décélération contrôlée.



**Figure 36. Décélération enregistrée lors d'une chute libre.**

De « Emergency braking system for the use with steel mine shaft guides », par A. du Preez et S. Hill, 2012, *Proceedings of Minexpo*, page 157.

Tout comme pour un parachute traditionnel, certains composants doivent être remplacés après une activation d'urgence :

- Pour un parachute traditionnel, il faut remplacer les guides en bois et vérifier l'affûtage des dents;
- Pour le système évolué, il faut changer les patins de friction, car leur coefficient de friction baisse après une activation d'urgence (Lunderstedt *et al.*, 2012).

### 5.3.3 Mise en œuvre in situ

En 2015, lors de cette étude, il y avait, à notre connaissance, trois mines qui avaient installé ce système évolué :

- Une aux USA;
- Une au Mexique;
- Une en Mongolie.

D'autres compagnies minières auraient également commandé le système évolué, notamment une mine au Honduras. La mise en service était prévue en 2014 (Kotze, 2014).

Pour la mine en Mongolie, le système a été mis en place en février 2014 (Kotze, 2014). Une entreprise est responsable du système de communication avec la salle des machines. Des précautions particulières ont été prises du fait des basses températures (jusqu'à -30°C) : les circuits imprimés sont prévus pour résister à ces températures et les huiles pour le système

hydraulique ont été adaptées. Les basses températures ne semblent donc pas être un frein à l'utilisation de ce type de technologie au Canada.

### 5.3.4 Sécurité et retour d'expérience

Le système de base a été utilisé pour le positionnement depuis plus de 30 ans en Afrique du Sud, y compris pour le transport de personnel (*du Preez et Hill, 2010; Lunderstedt et al., 2012*). Pour ce système, il n'y a pas de risque d'actionnement intempestif des pinces, car l'énergie nécessaire est uniquement fournie par le raccordement de la cage au système pneumatique de la mine. Par contre, le circuit pneumatique du système de base peut être contaminé lors des raccordements, mais pas le circuit hydraulique qui sert à appliquer les pinces. Le retour d'expérience et la fiabilité du système de positionnement sont donc connus, ce qui n'est pas le cas du système évolué.

Le principal risque appréhendé par l'industrie du système évolué, comme pour les parachutes traditionnels, est le déclenchement intempestif et non contrôlé (*Germain, 2014; Lunderstedt et al., 2012; McLaughlin, 2012*). Plusieurs redondances de natures différentes (mécanique, hydraulique, commande) sont utilisées afin d'assurer la fiabilité du système. De plus, le mécanisme d'application des pinces est *failsafe* (au sens du risque d'application intempestive, tel que mentionné par le fabricant) : un ressort garde les pinces écartées et seule une pression hydraulique peut forcer leur application sur le guide (*Lunderstedt et al., 2012*). Par ailleurs, l'activation du système parachute arrête la machine d'extraction pour éviter que le câble d'extraction ne s'empile sur le toit de la cage.

Une autre sécurité disponible est que la machine d'extraction ne peut fonctionner que lorsque la pression est suffisante dans l'accumulateur (capteur de pression dans l'accumulateur) (*du Preez et Hill, 2010*).

Cependant, à la lumière des informations précédentes, certains points prêtent à discussion :

- **Déclenchement intempestif** : par défaut, ce système est conçu pour ne pas freiner. En effet, les ressorts des pinces gardent les pinces ouvertes tant que les pistons hydrauliques ne sont pas activés. Ce choix de conception apparaît étonnant pour un dispositif de sécurité qui est de plus identifié par son concepteur comme *failsafe*;
- **Puissance de freinage** : elle n'est pas ajustée en fonction de la charge en cabine, donc les questions relatives aux valeurs de décélération avec la cage quasi vide demeurent;
- **Présence de deux circuits (pneumatique et hydraulique)** : quelle est l'influence sur la fiabilité de ces deux circuits, et surtout de la pièce centrale qu'est le « *power pack* » jumelée avec le multiplicateur de pression pneumatique/hydraulique?
- **Vulnérabilité à la chute d'objet dans le puits** : plusieurs images recensées indiquent que les différents constituants du système évolué sont montés sur le dessus de la cage avec pas ou peu de protection contre la chute d'objets. Sachant que ce dispositif assure une fonction de sécurité, nous nous questionnons sur la vulnérabilité du dispositif à la chute d'un objet (roche, outil, débris, etc.) dans le puits de mine ou même à l'empilement du câble sur le dessus de la cabine. De plus, tel que montré sur les illustrations, le système gênerait la réalisation de l'inspection du puits pour laquelle le travailleur est installé sur le toit de la cage. Une nouvelle version du système évolué présentée en 2015 intègre tous les éléments nécessaires dans la pince hydraulique, éliminant ce problème de vulnérabilité à la chute d'objet dans le puits.

Nous avons eu l'occasion d'échanger au mois d'août 2014 avec un utilisateur du système évolué et certains des points qu'il a soulevés sont repris ci-dessous. Pour cet utilisateur en particulier, le système a subi plusieurs défaillances, notamment au niveau des cellules de charges et des connexions électriques. L'utilisateur a mentionné que « le système est très complexe et demande beaucoup d'attention ». Par ailleurs, toutes les pompes air-huile ont développé des fuites internes et une pince a dû être changée, car celle-ci ne reprenait pas sa position ouverte correctement (elle n'était apparemment pas équipée de points de lubrification). De fait le système évolué a été isolé et désactivé en attendant que certains problèmes soient réglés.

## 5.4 Système évolué #2

Pour ce second système évolué nous n'avons pas d'information indépendante : toutes les informations présentées ont été fournies par le fabricant ou trouvées sur le site web de la compagnie lors de cette étude en 2014-2015. Par ailleurs, le nombre de documents récolté est plus faible que pour le système évolué précédent, étant donné que le système est plus récent. De plus, un des documents les plus complets a été retiré du site internet du fabricant durant la réalisation de cette étude. Il nous est donc difficile d'analyser avec certitude ce dispositif.

### 5.4.1 Du système de base au système évolué

Ce second système est prévu uniquement pour les cages, contrairement au système de base 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). Comme le système de base précédent, ce second système est une évolution d'un système prévu pour faire du positionnement.

Ce second système évolué est composé de :

- Panneau de station (avec transmetteur sans fil) : monté le plus près possible du puits, le panneau de station communique sans fil avec la cage. Chaque panneau est connecté au système de commande de la machine d'extraction;
- Panneau de contrôle dans la cage (avec récepteur sans fil);
- Système hydraulique monté sur le dessus de la cage (pompe hydraulique électrique, accumulateur hydraulique, jauges de pressions pour vérifier le système et la pression de freinage);
- Batterie installée à l'extérieur de la cage au-dessus (environ 100/120 applications par jour, avec un ensemble de 4 batteries);
- Système de « pinces » (*clamps*) (en aluminium, environ 240 lbs chaque).

Comme le système de base précédent, le second système peut être modifié afin d'inclure une fonction d'arrêt de la cage en cas de rupture du câble. Un accumulateur est rajouté sur la cage (comme pour le système de base précédent) afin d'appliquer le frein d'urgence en cas de rupture du câble.

### 5.4.2 Performance du système évolué et mise en œuvre in situ

À notre connaissance, lors de cette étude en 2014-2015, aucune installation minière ne dispose de ce second système évolué. Des essais devaient être menés aux installations du fabricant, mais nous n'avons pas été en mesure d'assister à ces essais ni de voir le système de positionnement à l'œuvre.

### 5.4.3 Sécurité et retour d'expérience

Nous n'avons pas trouvé en 2014-2015 de retour d'expérience relatif à l'utilisation de ce second système évolué.

Selon le fabricant, le système évolué dispose des caractéristiques suivantes :

- Les pinces ont été conçues afin de faciliter la maintenance. Pour assurer la sécurité, des clapets antiretours sont utilisés pour éviter le relâchement de la pression et des capteurs de proximité sont utilisés pour vérifier la rétractation complète des pinces avant l'opération de la machine d'extraction;
- Le système utilise des composants standards et un design basique pour les pièces hydrauliques. Les pinces utilisent une technologie similaire à celle d'un frein à disque classique;
- Le module sans-fil utilise une technologie qui a une fiabilité éprouvée dans l'industrie minière. Cependant, nous n'avons pas trouvé de valeurs pour quantifier cette fiabilité éprouvée.

Le second système de base propose une automatisation complète de la séquence de positionnement avec seulement deux boutons : « marche/arrêt » et « application/relâchement des pinces ». Tout comme le premier système évolué, ce système est considéré comme *failsafe* par ses concepteurs, mais sans plus de précisions.

Selon le fabricant, les sécurités suivantes sont implémentées dans le second système de base :

- Le système de base ne peut être activé qu'aux niveaux prévus, pas ailleurs - « *confident that inadvertent application during cage travel is not possible* ». Pour cela, les sécurités évitant l'application intempestive des pinces sont implémentées dans le code du système d'exploitation;
- Le système envoie une demande de « non fonctionnement » au système de commande du treuil d'extraction dès que la commande « application des pinces » est activée;
- Redondances de toutes les fonctions (pas de détail disponible);
- Relâchement contrôlé des pinces pour éviter les charges dynamiques (comme le système de base précédent);
- Surdimensionnement des pinces pour retenir deux fois la charge statique de la cage (comme le système de base précédent).

Les seconds systèmes, de base et évolué, fonctionnent en circuit fermé avec une batterie. Ce circuit fermé, uniquement hydraulique, présente l'avantage d'éviter l'introduction de contaminants qui pourraient perturber le bon fonctionnement du système. Enfin, il est très automatisé et laisse peu de place aux erreurs humaines.

## 5.5 Questionnements sur la fiabilité des parachutes modernes

Le tableau 18 présente une comparaison générale des parachutes traditionnels et des parachutes modernes (systèmes évolués). Chacun a des avantages et des inconvénients, mais les quatre points qui méritent attention sont :

- Pour le parachute classique :
  - Son avantage est de ne pas pouvoir se déclencher lorsque la cage monte avec une tension suffisante dans le câble;
  - Son inconvénient est son mode de déclenchement mécanique uniquement lié à la rupture du câble d'extraction;
- Pour un parachute moderne :
  - Son avantage est son mode de déclenchement qui peut être multiple (rupture du câble, accélération, survitesse, bouton en cabine, etc.);
  - Son inconvénient est la possibilité de déclenchement intempestif tant en montée qu'en descente.

**Tableau 18. Avantages et inconvénients des systèmes parachutes**

	<b>Classique</b>	<b>Moderne</b>
Avantages	Simplicité de fonctionnement Complètement autonome Système bien connu Facile d'entretien Pas d'application intempestive en montée	Plus léger selon les concepteurs Possibilité de contrôler la force de freinage, donc la décélération Les pinces servent aussi à faire du positionnement Activation possible selon plusieurs paramètres ou depuis la cage
Inconvénients	Peu de contrôle de la décélération : il faut jouer avec l'angle des dents et leur géométrie Activation uniquement par la rupture du câble Décélération plus importante si la cage est quasi-vide Dégradation des guides en bois sur la distance d'arrêt Compatible uniquement avec des guides en bois	Plus cher qu'un système classique Nécessite une source d'énergie externe (batterie électrique ou accumulateur de pression) Faible retour d'expérience Risque d'application intempestive dans les deux sens : montée et descente Décélération plus importante si la cage est quasi-vide

Le tableau 19 compare un parachute traditionnel aux deux parachutes modernes étudiés en fonction des critères suivants :

- Critère de déclenchement;
- Cause de déclenchement intempestif;
- Pièces à changer après activation;
- Compatibilité avec le matériau des guides.



**Tableau 19. Comparaison des parachutes traditionnels à leurs équivalents modernes**

	<b>Parachute traditionnel</b>	<b>Système évolué #1</b>	<b>Système évolué #2</b>
<b>Critère de déclenchement</b>			
Rupture du câble – détection mécanique	Oui	Oui	?
Rupture du câble – détection électronique	Non	Oui	?
Survitesse de la cage	Non	Oui	?
Accélération de la cage	Non	Oui	?
Commandes dans la cage	Non	Oui	?
Position de la cage dans le puits	Non	?	?
<b>Possibilité de déclenchement intempestif</b>			
En descente, câble non rompu et accélération faible	Non	Oui	Oui
En montée, câble non rompu et accélération faible	Non	Oui	Oui
En descente, câble non rompu et décélération forte	Oui (lors de l'effet yoyo)	Oui	Oui
En montée, câble non rompu et décélération forte	Oui (lors de l'effet yoyo)	Oui	Oui
<b>Pièces à changer après activation</b>	Oui (guides en bois + affûtage des dents)	Oui (patins de frottement)	?
<b>Compatibilité avec le matériau des guides</b>			
Compatible avec des guides en bois	Oui	?	?
Compatible avec des guides en métal	Non	Oui	Oui

Par ailleurs, certains points méritent une attention particulière : citons par exemple la communication entre la cage et la machine d'extraction, le déclenchement intempestif du parachute en montée, l'utilisation de l'électronique ainsi que la compatibilité des parachutes modernes avec des guides en bois.

### **5.5.1 Communication cage/machine d'extraction**

Les parachutes traditionnels fonctionnent sans aucune communication entre la cage et la machine d'extraction. Cependant, certaines cages sont déjà équipées de moyen de communication sans fil, permettant de transmettre des signaux directement de la cage lors de son déplacement dans le puits.

Mais selon des discussions tenues en 2014-2015, cette communication sans-fil entre la cage et la machine d'extraction n'est pas encore parfaite. Or les deux fabricants de parachutes modernes indiquent que la cage est en communication avec la machine d'extraction et que lors d'une activation des parachutes, un ordre est envoyé à la machine pour arrêter la rotation du tambour. Nous nous questionnons sur la fiabilité de cette communication et sur la gestion des défauts et

des pertes de communication sachant que des fonctions de sécurité<sup>25</sup> peuvent transiter par ce moyen de communication.

### **5.5.2 Déclenchement intempestif des parachutes en montée**

Les parachutes traditionnels ne peuvent pas s'enclencher lorsque la cage monte avec une tension suffisante dans le câble. Ceci est un avantage important par rapport aux parachutes modernes qui peuvent freiner la cage dans les deux sens, tant en descente qu'en montée. En effet, ces parachutes modernes sont une évolution d'un dispositif de positionnement, dispositif qui doit être capable de retenir la cage en descente (alourdissement) ou en montée (allègement de la cage).

Pour les parachutes modernes, un déclenchement intempestif du parachute en montée devient un risque qu'il faut gérer, mais les parachutes modernes offrent aussi la possibilité d'arrêter la cage avant l'écrasement dans le chevalement. Deux conséquences dommageables sont possibles : détérioration du câble suite à des efforts dynamiques trop importants ou dommage aux travailleurs suite à une décélération brutale de la cage en montée (projection des travailleurs vers le toit de la cage). Actuellement, les deux parachutes modernes étudiés le gèrent en gardant, par défaut, les pinces ouvertes. Or plusieurs éléments en série (accumulateur, premier circuit hydraulique, distributeur, second circuit hydraulique et vérin) interviennent pour fermer les pinces et il n'est pas possible de savoir si certains sont en état de panne latente (panne non encore détectée) depuis le dernier test de bon fonctionnement.

Il devrait être possible de concevoir un parachute à pinces qui ne soit que fonctionnel dans le sens de la descente. Cela aurait comme avantage de pouvoir utiliser des pinces qui, par défaut, sont activées et fermées par des ressorts. Par contre, cela supposerait de dissocier la fonction « positionnement de la cage » de la fonction « arrêt d'urgence de la cage ».

### **5.5.3 Utilisation de l'électronique**

Les parachutes traditionnels utilisent uniquement une technologie mécanique pour la commande et pour l'actionnement du parachute. A l'opposé, les parachutes modernes utilisent un mélange de technologies pneumatique, hydraulique et électronique pour commander et activer le serrage des pinces. Or la fonction de déclenchement du parachute est une fonction de sécurité, fonction qui est réalisée dans les dispositifs étudiés par un mélange d'électronique (capteurs de vitesse, d'accélération, de charge, etc.) et d'hydraulique. Nous nous questionnons sur la fiabilité de cette fonction de sécurité qui nécessite des études sérieuses.

---

<sup>25</sup> Selon la norme *ISO 13849-1:2006*, une fonction de sécurité est une « fonction d'une machine dont la défaillance peut provoquer un accroissement immédiat du (des) risque(s) » [ISO 13849-1, 2006]. La fonction d'arrêt d'urgence sur une machine est un exemple de fonction de sécurité. Ne pas confondre les fonctions de sécurité avec les fonctions standards. Ces dernières, aussi appelées « fonctions de commande standard », ne sont là que pour contribuer au fonctionnement de la machine en mode de production ou de réglage [Baudoin, J. et Bello, J.P., « Guide pratique d'application de la norme NF EN 62061 », Institut national de recherche et de sécurité (INRS), Vandoeuvre-lès-Nancy, Lorraine, France, Rapport technique IET/10RT-257/JBn/JBo, 2010.].

#### **5.5.4 Compatibilité des parachutes modernes avec des guides en bois**

Nous n'avons pas trouvé de références scientifiques (ou de résultats d'essais) traitant de l'utilisation de parachutes modernes avec des guides en bois. Selon le type de mine et le sens de la ventilation dans la mine, le taux d'humidité dans les guides en bois pourra varier fortement d'un niveau à l'autre, avec une influence possible sur le coefficient de friction. De plus, les joints entre les différentes portions des guides sont autant de restrictions pour un bon fonctionnement des parachutes modernes avec des guides en bois, et présentent un risque potentiel de choc sur le patin. Enfin, dans le cas de guides en bois endommagés, le comportement des parachutes modernes nous semble être difficile à anticiper. Pour toutes ces raisons, nous considérons pour l'instant que la compatibilité des parachutes modernes avec des guides en bois devrait être étudiée.

#### **5.6 Effets sur l'arbre de défaillance**

Le passage d'un parachute traditionnel à un parachute moderne modifie l'arbre de défaillance de deux façons :

Des événements élémentaires sont supprimés, car les causes ont été supprimées par le passage d'un parachute traditionnel à un parachute moderne (par exemple il n'y a plus de bourrage des dents, car il n'y a plus de dents);

Des événements élémentaires sont ajoutés pour tenir compte de la modification technique du parachute (nouveau moyen de déclenchement, circuit de puissance des pinces, etc.).

Dans le premier cas, douze événements élémentaires (A1, B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B10, B11, E8) sur les 48 sont supprimés si l'on passe d'un parachute traditionnel avec des dents à un parachute moderne avec des pinces (Tableau 20). De plus, le relâchement temporaire du parachute, sous arbre (A), n'est plus possible, car les deux dispositifs étudiés intègrent une valve antiretour sur le circuit hydraulique des pinces. Cependant, cette valve anti-retour a un rôle important, surtout si les secours mettent du temps à accéder à la cage pour en faire sortir les travailleurs. En effet, c'est elle qui garantit le maintien en position de la cage dans le puits. Toute défaillance, soudaine ou non, de cette valve entraînera une baisse de pression dans les pinces, avec un déplacement possible de la cage.

**Tableau 20. Liste des évènements élémentaires supprimés avec les parachutes modernes**

Évènements	Explications
A1, B5, B8	Dispositif de freinage par friction dont il est possible de régler la pression de serrage. Le serrage se fait graduellement.
B3, B10	Les guides en bois sont remplacés par des guides en acier, a priori plus résistants, uniformes, avec des tolérances dimensionnelles plus serrées que les guides en bois, sans problème d'hygrométrie du matériau ni d'éclatement
B1, B2, B4, B6, B7, B11	Le système est aussi utilisé pour faire du positionnement lors des arrêts de la cage. Si les pinces et les garnitures sont bien placées et fonctionnelles lors des arrêts aux niveaux, alors elles seront fonctionnelles lors d'un freinage d'urgence.
E8	Le mécanisme est monté sur le toit de la cage et le ressort en cabine disparaît.
C1	Réglementation : seules les cages d'une installation de machine d'extraction multicâble ne sont pas obligatoirement munies de parachutes (art. 323 du RSSM – <i>friction hoist</i> dans la version en anglais)
A2	Test réglementaire de chute libre
A3	Le dégagement sous le dernier niveau est supérieur à la plus grande distance de freinage de la cage
E4	Le ressort/les jauges de déformation sont correctement tarés

Malgré ce qui est écrit au-dessus, l'évènement élémentaire (E8) peut subsister si le système de déclenchement reste mécanique (avec le ressort). Cependant, il semble avantageux de le remplacer par des cellules de charge redondantes, plus petites et plus légères. Cette modification permet aussi de prendre en compte d'autres paramètres pour le déclenchement du parachute comme, par exemple, l'accélération, la vitesse de la cage, le sens de déplacement, la position de la cage dans le puits, etc. Malgré cela, la problématique de la force de déclenchement du ressort, liée à l'allègement des cages et à l'allongement des câbles, subsiste.

Dans le second cas, l'utilisation de parachutes modernes va entraîner l'ajout de branches supplémentaires dans l'arbre de défaillance, branches induites par les changements de conception du dispositif. Ces branches ne sont pas discutées ici faute de données fiables sur la conception des parachutes modernes. En effet, de nombreux évènements élémentaires pourraient survenir : fuite hydraulique, défaillance du système électronique de déclenchement, usure des garnitures, évolution des coefficients de friction (statique/dynamique) entre les garnitures et les guides, perte de puissance de l'accumulateur, etc.

Finalement, l'utilisation de parachutes modernes supprime beaucoup d'évènements élémentaires de la branche « force de freinage limitée » de l'arbre de défaillance. Un système de parachute moderne peut donc sembler, en théorie, plus sûr que les parachutes traditionnels. Cependant, des évènements élémentaires sont ajoutés à l'arbre et les probabilités d'occurrence des différents évènements sont modifiées. Il faut alors prendre en considération toutes ces modifications pour évaluer la sécurité globale du système. Sans données fiables sur la conception de ces parachutes modernes (les plans du système évolué #1 varient, la documentation du système évolué #2 a été retirée du site web du fabricant lors de cette étude, etc.), il nous est impossible de statuer sur la fiabilité de ces nouveaux dispositifs. Ces données concernent autant le dispositif lui-même que

son interverrouillage avec le système de commande de la machine d'extraction ou que le code informatique utilisé.

Par ailleurs, le risque du déclenchement non désiré du système (déclenchement intempestif) n'apparaît pas dans l'arbre de défaillance. Pour le traiter, il faudrait bâtir un arbre de défaillance spécifique relatif à l'évènement dangereux « déclenchement intempestif du parachute ». Cependant, une première conclusion est possible : pour un parachute traditionnel, il ne peut pas y avoir de déclenchement intempestif du parachute lorsque la cage se déplace dans le sens de la montée, car les dents ne peuvent pas pénétrer dans les guides lorsque la cage se déplace vers le haut. Par contre, pour les parachutes modernes, il est tout à fait possible de serrer les guides dans les pinces dans les deux sens de déplacement de la cage. Le déclenchement intempestif du dispositif est donc théoriquement possible en montée comme en descente. Ce nouveau risque, le déclenchement intempestif en montée, est donc à considérer et doit être évalué spécifiquement, avec des plans détaillés et définitifs.

## 5.7 Synthèse et recommandations

Le parachute traditionnel a été inventé pour retenir la cage lors de la défaillance du câble, évitant ainsi sa chute incontrôlée dans le puits. Il ne peut donc, au mieux, que répondre à ce besoin.

Un parachute idéal devrait permettre d'éviter l'écrasement de la cage au fond du puits :

- Suite à la défaillance du câble;
- Suite à une défaillance mécanique de la machine d'extraction :
  - Par exemple rupture de la liaison moteur/tambour ou défaillance des freins;
- Suite à une défaillance du système de commande de la machine d'extraction :
  - Par exemple défaillance du frein de treuil;
  - Ou survitesse en descente;
  - Ou non-déclenchement du freinage au fond du puits.

Un parachute idéal doit répondre à ces cinq objectifs distincts. Or, le parachute traditionnel ne répond qu'à un seul, la défaillance du câble. Son taux de réponse aux évènements indésirables primaires peut donc être estimé à 1/5.

Considérant les derniers incidents survenus dans des puits de mine au Québec, les défaillances répertoriées d'écrasement de cage ou de skip dans les chevalements aux États-Unis d'Amérique ou en Afrique du Sud ainsi que la modernisation des machines d'extraction et de leur système de commande, nous sommes d'avis que la mission des parachutes doit être enrichie afin de pouvoir assurer la sécurité des travailleurs, si possible dans tous les cas d'évènements indésirables primaires énumérés ci-dessus.

Certaines de nos recommandations ont déjà été formulées par McLaughlin (McLaughlin, 2012) dont :

- Synchroniser la machine d'extraction et les parachutes pour les conditions listées ci-dessous :
  - Tension excessive dans le câble en montée : la machine arrête;
  - Mou de câble en descente : arrêt de la machine d'extraction et si la tension ne revient pas, application des parachutes;
  - Mou de câble en montée : la machine d'extraction laisse la cage ralentir par gravité, puis freinage contrôlé, et parachute qui s'enclenche si la tension ne revient pas.
- Améliorer la communication entre la machine d'extraction et les parachutes.
- Améliorer le contrôle du freinage des parachutes modernes en tenant compte de la vitesse et de la direction de la cage.
- Rendre les systèmes embarqués autonomes en énergie, par exemple en installant un alternateur pour charger la batterie.

## Recommandations

Afin de voir à moyen terme à la mise en œuvre de parachutes modernes, nous formulons les recommandations suivantes. Il appartiendra au législateur de considérer si tout ou partie de ces recommandations doivent être intégrés dans les textes de loi, et aux industriels de mettre en place certaines de ces recommandations s'ils les jugent pertinentes. Les recommandations sont présentées en ordre séquentiel sans organisation par niveau d'importance, mais en suivant le plan de présentation de la section.

### Recommandation 5.1 :

Enrichir la mission des parachutes afin qu'ils puissent assurer la sécurité des travailleurs pour tous les événements dangereux suivants :

- Défaillance du câble;
- Défaillance mécanique de la machine d'extraction :
  - Par exemple rupture de la liaison moteur/tambour ou défaillance des freins;
- Défaillance du système de commande de la machine d'extraction :
  - Par exemple défaillance du frein de treuil;
  - Ou survitesse en descente;
  - Ou non-déclenchement du freinage au fond du puits.

### Recommandation 5.2 :

Synchroniser la machine d'extraction et les parachutes pour tenir compte de :

- La tension excessive dans le câble en montée;
- Le mou de câble en descente;
- Le mou de câble en montée.

### Recommandation 5.3 :

Améliorer la communication entre la machine d'extraction et les parachutes en tenant compte des dysfonctionnements possibles.

Recommandation 5.4 :

Améliorer le contrôle du freinage des parachutes modernes en tenant compte de la vitesse et de la direction de la cage.

Recommandation 5.5 :

Rendre les parachutes modernes autonomes en énergie.

Recommandation 5.6 :

Réaliser de nombreux essais de chute libre et de dégagement rapide, dans un laboratoire indépendant ou dans une mine pilote, avant d'équiper les cages de parachutes modernes.

Recommandation 5.7 :

Étudier la fonctionnalité de ce type de système sur des guides en bois.





## 6. CONCLUSION

Ce deuxième volet de l'expertise « Modernisation des parachutes de transporteurs de mines » porte uniquement sur le cas où l'évènement dangereux est la rupture du câble. Le cas de perte de contrôle de la cage sans rupture du câble sera traité dans le volet [3](#).

Avec la volonté de l'industrie minière de se tourner vers des guides en acier, les autorités régulatrices se trouvent face à la question de fiabilité des parachutes modernes qui font leur apparition sur le marché. On se questionne sur ces systèmes de parachutes modernes pour lesquels le retour d'expérience est très limité. Le législateur a alors trois choix : soit il utilise une approche déterministe pour gérer le risque lié à l'introduction de ces nouveaux systèmes, soit il utilise une approche probabiliste reposant sur un critère d'acceptabilité du risque avec cependant un retour d'expérience limité, soit il combine les deux approches. Une rapide analyse coût-bénéfices montre que l'utilisation de parachutes, classiques ou modernes, est appropriée.

Une solution de facilité serait de poursuivre l'exploitation minière avec des guides en bois et l'utilisation de parachutes traditionnels. Cette solution, refusant d'affronter les réalités de l'exploitation minière des années à venir sous couvert de conservatisme, ne nous semble pas être la voie à privilégier. Cependant, cette solution restera d'actualité pour un certain temps, car les puits actuels dont les guides sont en bois ne seront pas modernisés à court terme avec des guides en métal.

Le rapport a présenté un bref rappel de l'analyse de risque, du concept ALARP et de l'analyse coût-bénéfice. Le cas de l'écrasement de la cage est relativement délicat, car c'est un évènement dont la probabilité est faible, voire très faible, mais dont les conséquences sont graves, voire très graves. Cependant, une rapide analyse coût-bénéfice semble indiquer que la mise en place d'un facteur d'évitement supplémentaire (le parachute) est intéressante, ce qui va dans le sens de la philosophie nord-américaine qui requiert encore l'utilisation de parachutes pour le transport de personnes.

La section 2 a détaillé les problématiques liées aux câbles d'extraction. Les câbles mixtes sont de plus en plus répandus dans l'industrie minière et offrent des performances plus intéressantes que les câbles à 100 % en acier. Outre ces performances accrues, ce type de câble limite également la corrosion interne ce qui est bénéfique. À plus long terme, les câbles entièrement réalisés en fibres d'aramide visent à se débarrasser des problèmes de corrosion. Les causes d'usure et de rupture des câbles sont de mieux en mieux comprises et les nouveaux outils (inspection électromagnétique et suivi continu) permettent d'estimer plus fidèlement la durée de vie résiduelle des câbles, et ainsi d'assurer une plus grande sécurité dans l'opération de la cage. Un entretien régulier, voire une lubrification automatisée des câbles d'extraction, pourraient être privilégiés afin d'améliorer la sécurité des transporteurs.

Les dispositifs de suivi continu de l'état du câble existent sous deux formes : optique ou électromagnétique. Les systèmes électromagnétiques semblent plus performants et permettent surtout d'identifier des défauts qui n'apparaissent pas en surface des câbles. Ce type de système, obligatoire pour l'abaissement du FS, pourrait être généralisé afin d'améliorer la sécurité des cages. Enfin, un contrôle du freinage permet d'éviter une partie des charges dynamiques sur le câble, et donc d'en prolonger la vie. L'Afrique du Sud a choisi de se passer de parachutes en

concentrant ses efforts sur l'évitement de la rupture du câble. Les mesures permettant l'opération de cages sans présence de parachutes sont d'ordre technique d'une part (suivi continu de la charge, très bonne compréhension des modes d'usure et de rupture des câbles...) et d'ordre humain et organisationnel d'autre part (formation et certification des inspecteurs de câble, contrôle des inspections, du matériel et des personnes responsables de l'entretien et du suivi des câbles par le *Chief Inspector of Mines*...). Indépendamment du choix législatif d'imposer ou non l'utilisation de parachutes, il sera difficile d'obtenir au Québec un niveau de fiabilité des câbles comparable à celui obtenu en Afrique du Sud sans faire des efforts tant sur le plan technique que sur les plans humain et organisationnel.

Les parachutes traditionnels, installés sur la quasi-totalité des cages en service au Québec sont pour la plupart de type Ontario. Ce type de parachute développé dans les années suivant l'accident de Paymaster en 1945 a montré, au cours du temps, une fiabilité certaine et une bonne consistance dans les décélérations enregistrées lors des ruptures de câbles. Ce type de parachute est équipé d'un mécanisme de compensation de l'usure des guides en bois. Ce mécanisme de compensation a été étudié et il apparaît qu'il est relativement efficace, sans pour autant être parfait. Ceci étant, si le parachute est correctement conçu (avec un FS suffisant) et que l'hygrométrie des guides reste dans les normes, une usure légère des guides ne devrait pas poser de problème en cas de rupture du câble. De même pour un gonflement limité des guides. La comparaison des résultats fournis par certaines mines québécoises aux valeurs indiquées dans différents rapports de recherche consultés indique que les valeurs des résistances moyennes du bois (F/T) sont presque toujours comprises entre 3000 et 5000 lb/po<sup>2</sup> et cette valeur peut être considérée comme constante pour une géométrie de dent et une essence de bois donnée. Les parachutes traditionnels ne sont pas en mesure d'ajuster la décélération de la cage en fonction du nombre d'occupants. Cependant, la décélération globale peut être ajustée en faisant varier l'angle de la dent et ses dimensions. Enfin, la section 3 discute de la pertinence d'une décélération minimale pour les essais de chute libre, comme c'est le cas dans la majorité des provinces et territoires du Canada. Cependant, les tests de décélération sont effectués à pleine charge. Imposer une décélération minimale, par exemple de 0,9 ou de 1 g, à pleine charge peut entraîner, surtout pour de grandes cages, une accélération très importante à faible charge, par exemple avec un ou deux travailleurs. Plus les cages sont légères et plus elles sont de grande capacité, plus une faible augmentation de la décélération à pleine charge aura un effet aggravant à faible charge en imposant de très fortes décélérations aux travailleurs présents dans la cage.

Enfin, le rapport a présenté les deux systèmes parachute modernes (systèmes évolués) disponibles de cette étude en 2014-2015 sur le marché à notre connaissance. Les systèmes de parachutes modernes ouvrent la voie à la généralisation des guides en acier pour les cages, tout en permettant de conserver les parachutes. Ces systèmes semblent, d'un point de vue théorique, bien conçus et plus sécuritaires que les parachutes traditionnels discutés en section 3, car ils permettent d'éviter l'écrasement de la cage en cas de défaillance de la machine d'extraction. Cependant, ces systèmes récents sont encore peu répandus, et de fait, le retour d'expérience est encore très limité. En particulier, la crainte d'un déclenchement non désiré des parachutes modernes semble freiner leur adoption dans l'industrie minière. Cette crainte légitime devrait être étudiée en détail avant d'arrêter un jugement définitif. Ainsi, il paraît difficile d'estimer qui des parachutes traditionnels ou des parachutes modernes est le plus sécuritaire.

S'il s'avérait que la probabilité de déclenchement intempestif des parachutes modernes soit trop élevée, il serait probablement raisonnable de modifier la conception de ces systèmes afin d'éviter le déclenchement non désiré. Abandonner l'utilisation de systèmes parachutes n'est pas à l'ordre du jour au Canada et cette décision doit être un choix de société qui doit être débattu et accepté, d'autant plus qu'il implique un changement d'approche face au risque et à son acceptabilité.



## BIBLIOGRAPHIE

- 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, 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, 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*
- ASTM D4172:2010, 2010, Standard Test Method for Wear Preventive Characteristics of Lubricating Fluid (Four-Ball Method), ASTM D4172, ASTM, American Society for Testing and Materials
- 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)*
- Barry, A. L., 1982, "Shaft conveyance safety catch report", *Haileybury School of Mines*
- Baumann, M., 2009, "Cognitions from the Schilthorn Incident Regarding Track Rope Maintenance", *International Organisation for Transportation by Rope - North American Continental Section*
- 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
- 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., 2010, "Innovative Magneto-Inductive Systems for Metallic Ropes", 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow 2010, June 7-11 (ECNDT 2010)
- Chaplin, C. R., 2008, "Interactive Fatigue in Wire Rope Applications", *Proceedings of the Conference on the Mechanics of Slender Structures - Baltimore*
- Chaplin, C. R. and Potts, A. E., 1991, "Wire rope offshore - A critical review of wire rope endurance research affecting offshore applications", *Health & Safety Executive (HSE), Offshore Technology Report*, Rapport n° OTH 91 341
- Cool, J., 2007, "Étude de trois procédés d'usinage de finition du bois de bouleau blanc", *Université Laval, Mémoire de Maîtrise ès Science*

- 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
- D.Haase, E.-S.Wacker, E.G.Schukat-Talamazzini, et J.Denzler, 2010, "Analysis of Structural Dependencies for the Automatic Visual Inspection of Wire Ropes", *Proceedings of the 15th International Workshop on Vision, Modelling, and Visualization*
- Descourrière, S., Farret, R., and Bouissou, C., 2006, "Intégration de la dimension probabiliste dans l'analyse des risques - Partie 1 : principes et pratiques", *INERIS*, Rapport n° DRA 34 - Opération j
- du Preez, A. et Hill, S., 2010, "Emergency braking system for the use with steel mine shaft guides", *Proceedings of the international conference on hoisting and haulage*
- du Preez, A. et Hill, S., 2012, "Emergency braking system for the use with steel mine shaft guides", *Proceedings of Minexpo*
- Etherton, J. R., 2007, "Industrial Machine Systems Risk Assessment: A Critical Review of Concepts and Methods", *Wiley & Sons, Risk Analysis*, Vol. 27, n°1
- Flaus, J.-M., 2014, "L'analyse des risques industriels", *Industrie & Technologie*, Vol. Avril 2014, n°964
- 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*
- Gauvin, J.-P., 2011, "Le principe ALARA en prévention", *Travail et Santé*, n° Décembre
- Giraud, L. and Galy, B., 2022, "Modernisation des parachutes de transporteurs de mines : volet 1 - État de l'Art", *IRSST*, Rapport-n°QR-1156-fr
- 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)*
- Guse, A., 2014, Safety Dog Deceleration Issues - *Personnal communication*
- 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, 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*
- HSE, 2014a, "ALARP "at a glance"", <http://www.hse.gov.uk/risk/theory/alarpglance.htm>, *HSE Website*
- HSE, 2014b, "Cost Benefit Analysis (CBA) checklist", <http://www.hse.gov.uk/risk/theory/alarpcheck.htm>, *HSE Website*
- IATA, 2015, "Safety report 2014 - Issued April 2015", *International Air Transport Association*
- ISO 13850, 2006, Safety of machinery - Emergency stop - Principles for design, ISO 13850:2006, International Organisation for Standardization
- ISO 4309, 2010, "Appareils de levage à charge suspendue - Câbles - Entretien et maintenance, inspection et dépose - Quatrième édition"
- 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
- Kotze, C., 2014, "SA-manufactured safety system installed at Mongolian copper mine", *Mining Weekly*, n°February 2014
- Kumar, A. et Hem, P., 2012, "Technomine - Hoists (Infomine website)", <http://technology.infomine.com/reviews/Hoists/welcome.asp?view=full>, *Infomine*
- L-SA, 1993, "Minerals Amendment Act 103 of 1993"
- L-SA, 1996, "Mine Health and Safety Act 29 of 1996"
- L-SA, 2002, Mineral and Petroleum Resources Development Act 28 of 2002, L-SA
- 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
- Lavoie, M.-A., 2011, "Réflexion et outils de communication du risque chez Rio Tinto Alcan", *Colloque IRSST - La perception et la communication du risque en Santé et Sécurité au Travail*
- Lebeau, M. and Duguay, P., 2011, "Les coûts des lésions professionnelles - Une revue de littérature", *IRSST, Projets spéciaux, Études et recherche*, Rapport n° R-676
- Lefebvre, L., 2011, "Les principes directeurs en communication du risque", *Colloque IRSST - La perception et la communication du risque en Santé et Sécurité au Travail*
- 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*
- McIvor, R. A., 12-1-1996, "Mine shaft conveyance safety mechanism - free-fall testing", *CIM Bulletin*, Vol. 89, n°1004, p. 47-50
- McLaughlin, Bennett, 2012, Thoughts on the Horne system (Mine Expo, Las Vegas, September 26, 2012)
- 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
- NOPSEMA, 2012, "Guidance note - ALARP", *National Offshore Petroleum Safety and Environmental Management Authority*, Rapport n° N-04300-GN0166 Revision 4
- Penning, F. A., Sorensen, D. R., and Robertson, D. W., 1980, "Free fall testing of single tooth safety dogs on keruing guides", Colorado School of Mines
- 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
- 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-NSW, 2011, Guidelines - Mine winders - Part 7 : examination, testing and retirement of ropes, MDG 33.7, R-NSW
- R-NT, 2004, Mine Health and Safety Regulations, NWT Reg 125-95, Northwest Territories
- 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-SA, 2006, Mine Health and Safety Act 29 of 1996 - Regulations and Notices - Government Notice R846, R-SA
- R-SA, 2008, Mine Health and Safety Act 29 of 1996 - Regulations and Notices - Government Notice R992, R-SA
- R-SA, 2013, Mine Health and Safety Act 29 of 1996 - Regulations and Notices - Government Notice R9, R-SA
- R-SK, 2003, The Mines Regulations, Chapter O-1.1 Reg 2, Saskatchewan
- Shaft Sinkers, 2014, "Moab Khotsong Mine – formerly known as Vaal Reefs No. 11 Shaft", <http://www.shaftsinkersgroup.com/moab.aspx>
- R-WA, 2013, Mines Safety and Inspection Regulations 1995, Version 05-e0-03, R-WA
- 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*
- 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)*
- SANS, 996a, SANS 10293, Condition assessment of steel wire ropes on mine winders, SANS 10293, SANS, South African National Standard
- SANS, 2000b, SANS 10294, The performance, operation, testing and maintenance of drum winders relating to rope safety, SANS 10294, SANS, South African National Standard
- 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*
- 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
- 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
- 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
- Verreet, R., 2011, "What we can learn from wire rope failures: Predictable and unpredictable rope failures", *OIPEEC Conference*
- Voshell, M., 2004, "High Acceleration and the Human Body", *Ohio State University - Cognitive Systems Engineering Laboratory*
- Wedzicha, J., 2002, "Reported dogging incidents in Ontario : 1983 - 2001", *Ontario Ministry of Labour*



- Weischedel, H. R., 2005, "Crane Wire Rope Damage and Nondestructive Inspection Methods", *NDT Technologies, Inc.*
- 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 : LISTE DES RECOMMANDATIONS**

Cette annexe regroupe l'ensemble des recommandations formulées dans ce rapport. La numérotation est la même que celle adoptée dans les différents chapitres.

### **Recommandations visant le câble d'extraction (Chapitre 3)**

Recommandation 3.1 :

Prendre en considération les facteurs humains et organisationnels sud-africains qui ont été omis lors de l'intégration des codes de pratique SABS0293 et SABS0294 dans le RSSM (par exemple, désignation d'un ingénieur responsable de la machine d'extraction).

Recommandation 3.2 :

Considérer les effets d'endommagement cumulatif des câbles dans les critères de retrait de tous les câbles (pas seulement ceux dont le FS est réduit), soit avec la méthode du SABS0293, soit avec celle de l'ISO 4309.

Recommandation 3.3 :

Effectuer les examens visuels quotidiens des câbles à une vitesse réduite avec un éclairage fixe de minimum 800 lux sur une longueur correspondant à 1 seconde de défilement du câble.

Recommandation 3.4 :

Généraliser l'utilisation de systèmes de suivi continu de l'état du câble reliés au système de commande de la machine d'extraction, ou à tout le moins à un système d'alarme. Ce type de système existe et est déjà utilisé dans certaines mines au Québec.

Recommandation 3.5 :

Généraliser l'utilisation d'un système de suivi continu de la charge dans le câble relié à la machine d'extraction, ou à tout le moins à un système d'alarme. Ce type de système existe et est déjà utilisé dans certaines mines au Québec.

Recommandation 3.6 :

Investir dans la recherche sur les câbles d'extraction : modes de fatigue et de rupture, développement de câbles d'extraction hybrides ou 100 % synthétiques.

Recommandation 3.7 :

Qu'un organisme collige les résultats d'essais de rupture des câbles, les conditions d'utilisation de ces câbles dans les différents puits du Québec, les rapports d'inspection électromagnétique et les avis d'incidents (machine d'extraction, molette, câble d'extraction, cage, skip, cuffat ou boisage du puits) afin de proposer une base de données complète et à jour. Cette base de données pourra être utilisée (i) à des fins statistiques, (ii) à des fins de recherche (si désiré) dans l'optique d'améliorer la sécurité des transporteurs miniers. Une base de données de ce type existe en Afrique du Sud et est maintenue à jour par le *district mining engineer/government mining engineer* (DME/GME) (Udd, 2004).

**Recommandation 3.8 :**

Qu'un organisme indépendant (éventuellement pancanadien), s'inspirant des pratiques sud-africaines, soit mis en place pour former et superviser les inspecteurs de câbles.

**Recommandation 3.9 :**

Que des tests non destructifs soient effectués sur la partie du câble qui reste normalement enroulée sur le tambour. La fréquence de ses tests pourra être inférieure à celle des tests réglementaires réalisés sur le reste du câble.

**Recommandations visant les parachutes traditionnels (Chapitre 4)****Recommandation 4.1 :**

Définir une limite supérieure de décélération pour une cage « à vide » (avec un ou deux travailleurs).

**Recommandation 4.2 :**

Définir une longueur maximale de freinage pour une cage à pleine charge et pour une survitesse de 20 % par rapport à la vitesse maximale d'opération. En tirer une hauteur de dégagement minimale en fond de puits.

**Recommandation 4.3 :**

Bien vérifier lors des inspections mensuelles du boisage du puits les différents paramètres liés aux guides qui influencent la force de freinage du parachute dont :

- L'usure des guides qui influence la profondeur d'engagement des dents (événements B4, B7, B9, B10, B11 de l'arbre de défaillance);
- Les dimensions nominales des guides par rapport aux spécifications du parachute (B6);
- La bonne position latérale des dents / guides sur toute la hauteur du puits afin que l'engagement des dents se fasse le plus possible vers le centre des guides (événements B4 et B9 de l'arbre de défaillance);
- La qualité des guides et leur alignement (événements B3 et B9 de l'arbre de défaillance).

**Recommandation 4.4 :**

Limiter l'usure des guides à ½ pouce (12 mm), sur chaque face.

**Recommandation 4.5 :**

Toujours avoir les sections de guides en vis-à-vis de la même essence de bois (idéalement avoir la même essence de bois pour toute la hauteur du puits).

**Recommandation 4.6 :**

Faire des essais de laboratoire sur des guides en bois prélevés dans des puits en service (ou récemment fermés), afin de caractériser précisément leurs propriétés mécaniques : résistance, taux d'humidité, etc.

Recommandation 4.7 :

Définir un intervalle de pourcentage réglementaire pour le tarage du ressort déclencheur des parachutes et étudier l'effet de l'allègement des cages et de l'allongement des câbles sur les effets de traînée de câble.

Recommandation 4.8 :

Qu'un organisme collige de manière systématique tous les essais de chute libre pour toutes les cages en service au Québec et conserve ces documents même après le démantèlement d'une mine, afin de bâtir une base de données complète et à jour, qui pourra être utilisée (i) à des fins statistiques, (ii) à des fins de recherche (si désiré) dans l'optique d'améliorer la sécurité des transporteurs miniers.

### **Recommandations visant les parachutes modernes (Chapitre 5)**

Recommandation 5.1 :

Enrichir la mission des parachutes afin qu'ils puissent assurer la sécurité des travailleurs pour tous les événements dangereux suivants :

- Défaillance du câble;
- Défaillance mécanique de la machine d'extraction :
  - Par exemple rupture de la liaison moteur/tambour ou défaillance des freins;
- Défaillance du système de commande de la machine d'extraction :
  - Par exemple défaillance du frein de treuil;
  - Ou survitesse en descente;
  - Ou non-déclenchement du freinage au fond du puits.

Recommandation 5.2 :

Synchroniser la machine d'extraction et les parachutes pour tenir compte de :

- La tension excessive dans le câble en montée;
- Le mou de câble en descente;
- Le mou de câble en montée.

Recommandation 5.3 :

Améliorer la communication entre la machine d'extraction et les parachutes en tenant compte des dysfonctionnements possibles.

Recommandation 5.4 :

Améliorer le contrôle du freinage des parachutes modernes en tenant compte de la vitesse et de la direction de la cage.

Recommandation 5.5 :

Rendre les parachutes modernes autonomes en énergie.

Recommandation 5.6 :

Réaliser de nombreux essais de chute libre et de dégagement rapide, dans un laboratoire indépendant ou dans une mine pilote, avant d'équiper les cages de parachutes modernes.

Recommandation 5.7 :

Étudier la fonctionnalité de ce type de système sur des guides en bois.

## ANNEXE II : DÉFINITIONS

Quelques définitions générales sont données dans cette annexe afin d'aider le lecteur à la compréhension du texte.

**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.

**Culot** : dispositif servant à lier les torons entre eux aux extrémités du câble et ainsi à éviter son détournage (tiré de la norme G4). En anglais le terme équivalent est socket ou capping.

**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 1800-2000 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 3150m 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 III : TYPE ET USURE DES CÂBLES D'EXTRACTION

Le tableau 21, présente les différents types de câbles, leurs avantages et défauts, ainsi que l'utilisation recommandée. La figure 37 illustre les types de dommages sur les câbles.

**Tableau 21. Caractéristiques des câbles**

Adapté de « Guidance on the selection, installation, maintenance and use of steel wire ropes in vertical mine shafts », par Deep Mined Coal Industry Advisory Committee, 2004, p. 83  
(<https://www.hse.gov.uk/pubns/micvertical.pdf>). ©HSE, 2004.

Type de câble	Avantages	Défauts	Usage recommandé
Câble à torons ronds	Facile à examiner visuellement Assez flexible	Tendance à se tordre ( <i>twist</i> ) quand la tension change Assez vulnérable à l'usure	Petite machine d'extraction avec guides en câble Grosse machine d'extraction avec guides fixes Treuil à friction jusqu'à 1000 m de profondeur
Câble à torons triangulaires	Assez facile à examiner visuellement Plus résistant que les câbles à torons ronds pour le même diamètre et même matériau	Tendance à se tordre ( <i>twist</i> ) quand la tension change Moins flexible que les câbles à torons ronds	Petite machine d'extraction avec guides en câble Grosse machine d'extraction avec guides fixes Treuil à friction jusqu'à 1000 m de profondeur
Câble multi-toron	Antigiratoire Assez flexible	Difficile d'examiner l'intérieur visuellement	Treuils à tambour Treuils à friction Câbles d'équilibre
Câble plat	Antigiratoire Très flexible dans une direction Examen visuel aisé	Plutôt vulnérable à la corrosion Très onéreux	Câbles d'équilibre
Câble clos	Antigiratoire Résistant à l'usure externe Plus résistant que les autres câbles pour le même diamètre et même matériau Peut-être utilisé sous des charges radiales importantes	Peu flexible Impossible d'examiner l'intérieur Les câbles de grand diamètre peuvent se distordre	Treuils à tambour Treuils à friction jusqu'à 2000 m Treuil à cuffat
Câble semi-clos	Résistant à l'usure externe Les cassures des fils externes sont maintenues bloquées	Peu flexible	Câbles guides et câbles de frottement

**Tableau 22. Types de détérioration observables sur les câbles d'extraction**

Adapté de « Guidance on the selection, installation, maintenance and use of steel wire ropes in vertical mine shafts », par Deep Mined Coal Industry Advisory Committee, 2004, p. 83  
(<https://www.hse.gov.uk/pubns/micvertical.pdf>). ©HSE, 2004.

Détérioration observée	Position et étendue	Cause probable	Remèdes envisageables
Usure, abrasion externe	Sur un côté du câble	Le câble a glissé sur la molette du fait d'un freinage brusque du treuil	Modifier la procédure d'opération du treuil
	Intermittente	Vibrations excessives et frottement	Vérifier s'il y a des irrégularités au tambour (les vibrations peuvent survenir lors d'un changement de couche sur un tambour à enroulement multicouche)
Déformation plastique	Externe ou interne (intertorons)	Obstructions	Remplacer les câbles à torons ronds par des câbles à torons triangulaires ou câbles clos, ou utiliser un tambour à plus grand diamètre, ou utiliser un câble plus flexible. Le diamètre de la gorge de la molette devrait être 5 à 10 % plus grand que le diamètre effectif du câble
Corrosion	Localisée	Transporteurs à l'arrêt au même endroit : partie du câble exposée à des conditions corrosives	Varié la position d'arrêt du transporteur ou essayer de réduire la cause de corrosion
	Sur toute la longueur du câble	Mauvaise lubrification	Lubrification plus fréquente ou lubrifiant plus protecteur
		Conditions environnementales sévères	Câble en acier galvanisé, lubrification plus fréquente ou si possible protection du câble contre son environnement
Corrosion fatigue	N'importe où sur le câble	Conditions favorables à la fatigue conjuguées à de la corrosion	Éviter les conditions qui favorisent la fatigue et la corrosion
Plusieurs fils brisés, montrant des signes de fatigue	Tout le long du câble	Vibrations excessives causées par des guides rigides mal alignés ou une surface du tambour non lisse	Améliorations sur les guides ou le tambour
		Diamètre du tambour ou de la molette trop petit	Choisir un câble plus flexible
		Flexion secondaire ou jeu excessif	Envisager des câbles avec des couches de même épaisseur
		Surcharge du câble	Vérifier les chargements
	Sur deux lignes parallèles et à environ 140° de	Gorge de la molette trop petite	Élargir la gorge de la molette jusqu'à 5 à 10 % plus grand que le diamètre effectif du câble

Détérioration observée	Position et étendue	Cause probable	Remèdes envisageables
	circonférence l'une de l'autre		
	Au col de l'attache (culot)	Fréquence des cycles d'extraction	Augmenter la fréquence de changement du culot jusqu'à que la cause de rupture des fils puisse être identifiée
		Longueur de câble non modifiée insuffisante dans le culot	Utiliser une bonne procédure pour réaliser l'attache (culot)
		Brosse de fils mal nettoyée engendrant une répartition de la charge non uniforme	La brosse de fils doit toujours être très bien nettoyée avant de couler la résine ou le métal blanc
		Manque de pénétration du métal blanc, température du métal blanc incorrecte	Utiliser des procédures pour réaliser l'attache en métal blanc et de bonnes interfaces de connexion (sockets)
		L'arrondi du culot est incorrect (trop petit ou rugueux)	Vérifier l'arrondi et informer le supérieur qu'une action doit être prise
		Vibrations excessives causées par des guides rigides mal alignés ou une surface du tambour non lisse	Améliorations sur les guides ou sur le tambour
Défaut localisé, fils externe uniquement, possibilité de martensite	Domage par chute d'objet	-	
Distorsion	Parfois localisée (hernie), mais souvent tout le long du câble	Perte du lubrifiant interne	Lubrification plus fréquente et lubrifiant plus pénétrant
		Angle de déflexion trop grand	L'angle de déflexion ne devrait pas dépasser 1,5°
		Gorge de la molette trop étroite	Élargir la gorge de la molette jusqu'à 5 % à 10 % plus grand que le diamètre effectif du câble
	Localisé, déformation permanente	Mou de câble	Faire plus attention dans l'usage du câble
Fragilisation martensitique	Parfois localisé, sur un côté du câble	Frottement à haute vitesse sur un objet métallique obstruant	Enlever l'objet obstruant

galling scars



track rope jerked over a steel shoe  
[slid under high pressure]

alien metal build-up



haul rope slid along a track rope  
after a flip-over

inhibited sliding of the wires



lack of lubrication

fusion traces



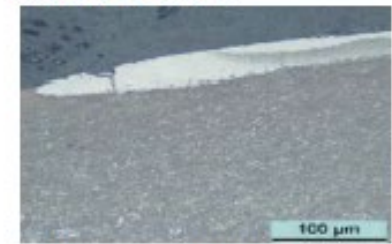
lightning has struck the wire rope

electrical current



welding works in the vicinity of  
the track rope

martensite formation



e.g. due to a rope derailment,  
slippage of a rope clamp etc.

deep grooves, scratches



e.g. from detached grease-nipple  
balls protruded in the saddle shoe

hit marks



unprofessional de-icing by means  
of steel hammer scale

abrasion



e.g. from clamps continuously  
scrubbing along the rope

corrosion



inappropriate support material,  
insufficient protection

corrosion



presence of humidity and lack of  
lubrication

wire break



e.g. from a slid rigging clamp

**Figure 37. Types de dommages observables sur les câbles.**  
(De Baumann, 2009. Reproduit ave permission.)

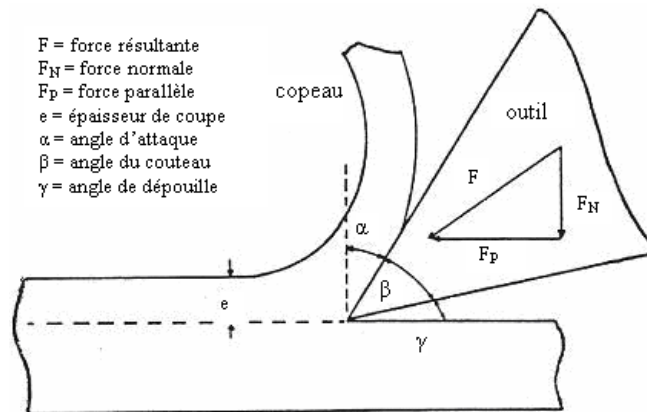
## ANNEXE IV : LE RABOTAGE ORTHOGONAL

**Cette annexe présente un extrait du mémoire de Maîtrise de Mme Julie Cool (Cool, 2007).**

Tel que mentionné précédemment, la coupe orthogonale est produite par l'action d'un outil de coupe qui crée une surface parallèle à l'originale. Le rabot de menuisier, la scie à ruban, la scie circulaire, le tour à bois et la trancheuse sont des exemples d'outils et de machines-outils travaillant selon ce mode de coupe.

Essentiellement, la géométrie de coupe associée avec le rabotage orthogonal permet d'identifier trois angles de coupe [Figure 38]. Premièrement, l'angle d'attaque ( $\alpha$ ) affecte la pénétration de l'arête tranchante dans le bois et intervient lors du dégagement du copeau suite à la coupe. Il affecte ainsi de manière directe les efforts impliqués durant la coupe. Deuxièmement, l'angle de dépouille ( $\gamma$ ) permet d'éviter le talonnement du bois sur l'outil. S'il est trop faible, la face de dépouille va frotter sur le bois, provoquant l'échauffement et l'usure de l'outil. Par contre, s'il est trop grand l'arête tranchante devient plus fragile. Enfin, l'angle du couteau ( $\beta$ ) est le complémentaire des deux précédents et conditionne la résistance de l'outil à l'usure. Plus l'angle  $\beta$  est élevé, plus l'outil sera résistant à l'usure. Il est à noter que les angles les plus adéquats sont choisis en fonction du type d'usinage, du matériau usiné et de la composition de l'outil (Jodin 1994).

Par ailleurs, la force résultante qui agit sur le bois peut être décomposée en une force parallèle ( $F_P$ ) et une force normale ( $F_N$ ) [Figure 38]. Bien entendu, la grandeur et la direction des composantes parallèle et normale de la force résultante vont dépendre des divers facteurs propres à l'outil de coupe, aux conditions de travail ainsi qu'au matériau travaillé (Koch 1985). Étant donné que les forces de coupe sont responsables du type de copeau formé et de la qualité de la surface, elles ont été étudiées par plusieurs auteurs. À première vue, la force de coupe augmente avec l'usure des outils de coupe (Huang 1994a; Hernández et Rojas 2002; Hernández et de Moura 2002). À l'inverse, elle diminue avec l'augmentation de l'angle d'attaque (Woodson et Koch 1970; Stewart 1977; 1988; Komatsu 1993; Huang 1994b; Jin et Cai 1996).



**Figure 38. Géométrie de la coupe orthogonale et des composantes de la force de coupe résultante.**

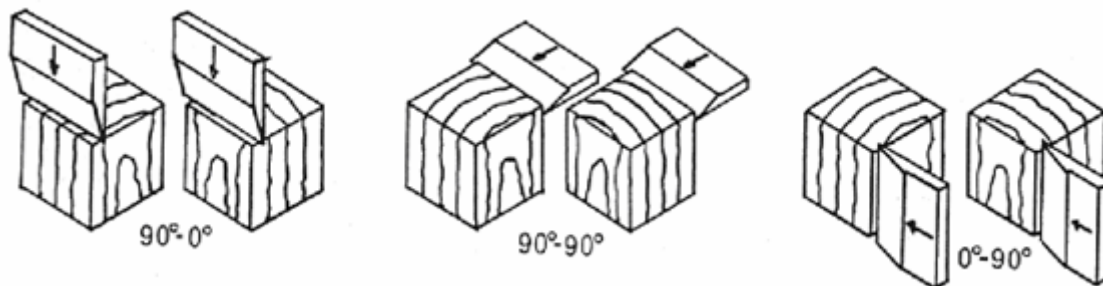
(Adaptée de Woodson et Koch, 1970)

McKenzie (1960) a proposé une notation comportant deux chiffres pour décrire la coupe orthogonale. Le premier correspond à l'angle entre l'arête tranchante de l'outil et le fil du bois. Le second est l'angle entre la direction de la coupe et le fil du bois. Il y a donc trois principaux types de coupe orthogonale :  $90^\circ-0^\circ$ ,  $90^\circ-90^\circ$  et  $0^\circ-90^\circ$  [Figure 39].

### La coupe $90^\circ-0^\circ$

La coupe orthogonale en direction  $90^\circ-0^\circ$  se présente dans des procédés tels que le tranchage longitudinal et le rabotage manuel. Il s'agit du type de coupe associé à tout travail effectué suivant la direction du fil du bois (**NDA : c'est le cas pour les parachutes dans les mines**). Ce genre de coupe engendre trois principaux types de copeaux dénommés type I, type II et type III par Franz (1958).

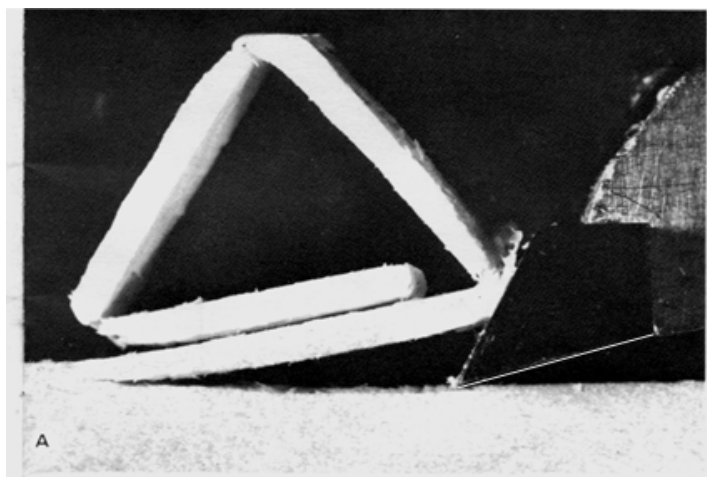
Le copeau de type I est caractérisé par la propagation de la fissure à l'avant de l'outil de coupe. Le copeau est donc maintenu comme une poutre encadrée en porte-à-faux jusqu'à ce que la contrainte de flexion excède la contrainte de rupture du bois [Figure 40]. L'emploi d'un angle d'attaque élevé, supérieur à environ  $25^\circ$ , de même qu'une épaisseur de copeau assez grande favorise la formation des copeaux de type I.



**Figure 39. Principaux types de coupe orthogonale.**

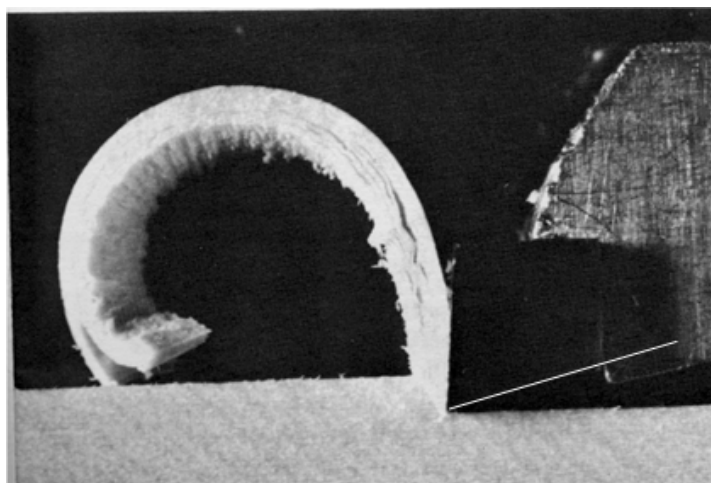
(Adaptée de Hoadley 2000)





**Figure 40. Copeau de type I, obtenu en direction  $90^{\circ}$ - $0^{\circ}$ , à un angle d'attaque de  $25^{\circ}$  et 1,14 mm de profondeur de coupe.**  
(Tirée de Woodson et Koch 1970)

Le copeau de type II est formé lorsque la rupture du bois se produit le long d'une ligne qui s'étend à partir de l'arête tranchante de l'outil et provoque des contraintes de cisaillement diagonales [Figure 41]. Le copeau est ainsi formé en continu, ce qui limite l'apparition de défauts sur la surface. Les conditions qui permettent la formation de ce type de copeau sont l'emploi d'un angle d'attaque situé entre  $10^{\circ}$  et  $25^{\circ}$  et de faibles épaisseurs de coupe. Stewart (1977) a déterminé que l'angle d'attaque optimal correspond à celui qui minimise la composante normale de la force de coupe.



**Figure 41. Copeau de type II, obtenu en direction  $90^{\circ}$ - $0^{\circ}$ , à un angle d'attaque de  $15^{\circ}$  et 1,14 mm de profondeur de coupe.**  
(Tirée de Woodson et Koch 1970)

Enfin, le copeau de type III est formé lorsque les forces induites par l'outil produisent des ruptures par compression et cisaillement longitudinal devant son arête tranchante. Le copeau est sans forme précise et il se brise en petits morceaux. Les conditions qui favorisent la formation de ce type de copeau sont l'utilisation d'angles d'attaque faibles ou négatifs ainsi que l'emploi d'outils de coupe émoussés.

Hernández, R.E. et G. Rojas. 2002. *Effects of knife jointing and wear on the planed surface quality of sugar maple wood*. Wood and Fiber Science, 34(2):293-305.

Hernández, R.E. et L.F. de Moura. 2002. *Effects of knife jointing and wear on the planed surface quality of northern red oak wood*. Wood and Fiber Science, 34(4):540-552.

Huang, Y.-S. 1994a. *Cutting force components in orthogonal cutting parallel to the grain (90-0) II. Effects of feed lengths*. Mokuzai Gakkaishi, 40(10):1059-1066.

Huang, Y.-S. 1994b. *Cutting force components in orthogonal cutting parallel to the grain (90-0) I. Effects of the rake angles*. Mokuzai Gakkaishi, 40(10):1134-1140.

Jin, W. et L. Cai. 1996. *Study and analysis on cutting forces of oblique cutting of wood*. Holz als Roh- und Werkstoff, 54(4):283-286.

Koch, P. 1985. *Utilization of hardwoods growing on southern pine sites*. Volume II. Processing. Agriculture handbook N°. 605, USDA, Forest Service, Washington, DC.

Komatsu, M. 1993. *Machining performance of a router bit in the peripheral milling of wood I. Effects of the radial rake angle of the peripheral cutting-edge on the cutting force and machined-surface roughness*. Mokuzai Gakkaishi, 39(6):628-635.

Stewart, H.A. 1977. *Optimum rake angle related to selected strength properties of wood*. Forest Products Journal, 27(1):51-53.

Woodson, G.E. et P. Koch. 1970. *Tool forces and chip formation in orthogonal cutting of loblolly pine*. Forest Service Research Paper SO-52. U.S. Department of Agriculture.

## ANNEXE V : RESULTATS DU RAPPORT DE LA COLORADO SCHOOL OF MINES

Le tableau 23 donne les décélérations mesurées pour une cage de poids constant, avec des vitesses d'essais et des largeurs de dent différentes (profondeur constante 1 po) (Penning *et al.*, 1980). On remarque que pour un même poids, avec les mêmes parachutes, en faisant varier la vitesse d'essai, les résultats sont très différents. Cependant il n'y a pas de tendance nette. L'influence de l'humidité des guides n'est pas clairement identifiable non plus : dans certains cas, des guides humides donnent une décélération plus faible que pour des guides secs, dans d'autre on observe l'inverse.

**Tableau 23. Valeurs de décélérations mesurées en faisant varier la largeur des dents et la vitesse**

L = 1.5 po			L = 2.25 po			L = 2.75 po		
V (ft/min)	Décel (g)	Guide	V (ft/min)	Décel (g)	Guide	V (ft/min)	Décel (g)	Guide
868	1,30	Sec	835	2,20	Sec	824	2,39	Sec
1037	1,06	Sec	849	2,22	Sec	857	2,86	Sec
1168	0,89	Sec	1078	2,13	Sec	1080	2,29	Sec
1290	1,18	Sec	1283	2,24	Sec	1312	3,33	Sec
838	1,64	Humide	849	2,35	Humide	832	2,30	Humide
869	1,31	Humide	1089	1,64	Humide	1106	2,51	Humide
1060	1,37	Humide	1311	1,32	Humide	1303	2,29	Humide
1344	1,47	Humide						

On note que lorsque l'aire augmente, la décélération augmente [Tableau 23]. Par contre, la résistance moyenne du bois est généralement de l'ordre de 3000 à 5000 lb/po<sup>2</sup> [Figure 31].

La figure 42 est similaire à la figure 31 et compare les résistances moyennes du bois (F/T) en prenant les aires réelles des dents (d'après la mesure de la profondeur). Le fait de considérer la profondeur nominale ou réelle des dents ne donne pas de changement significatif dans le graphique, la résistance moyenne est toujours comprise entre 3000 et 5000 lb/po<sup>2</sup>.

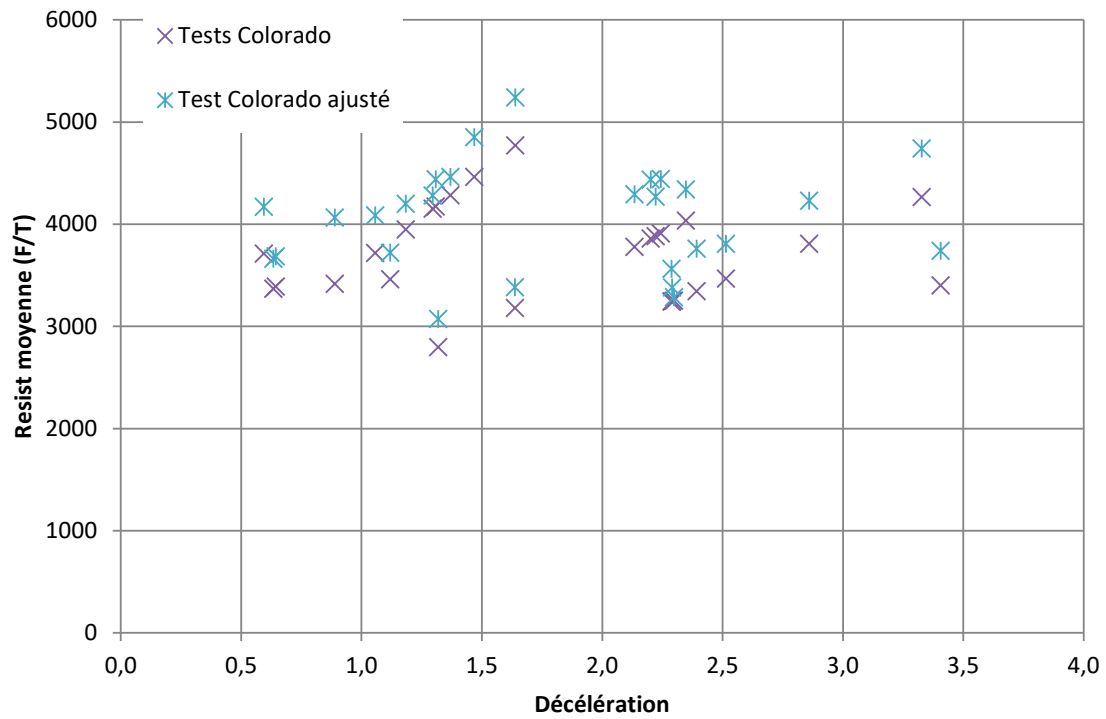
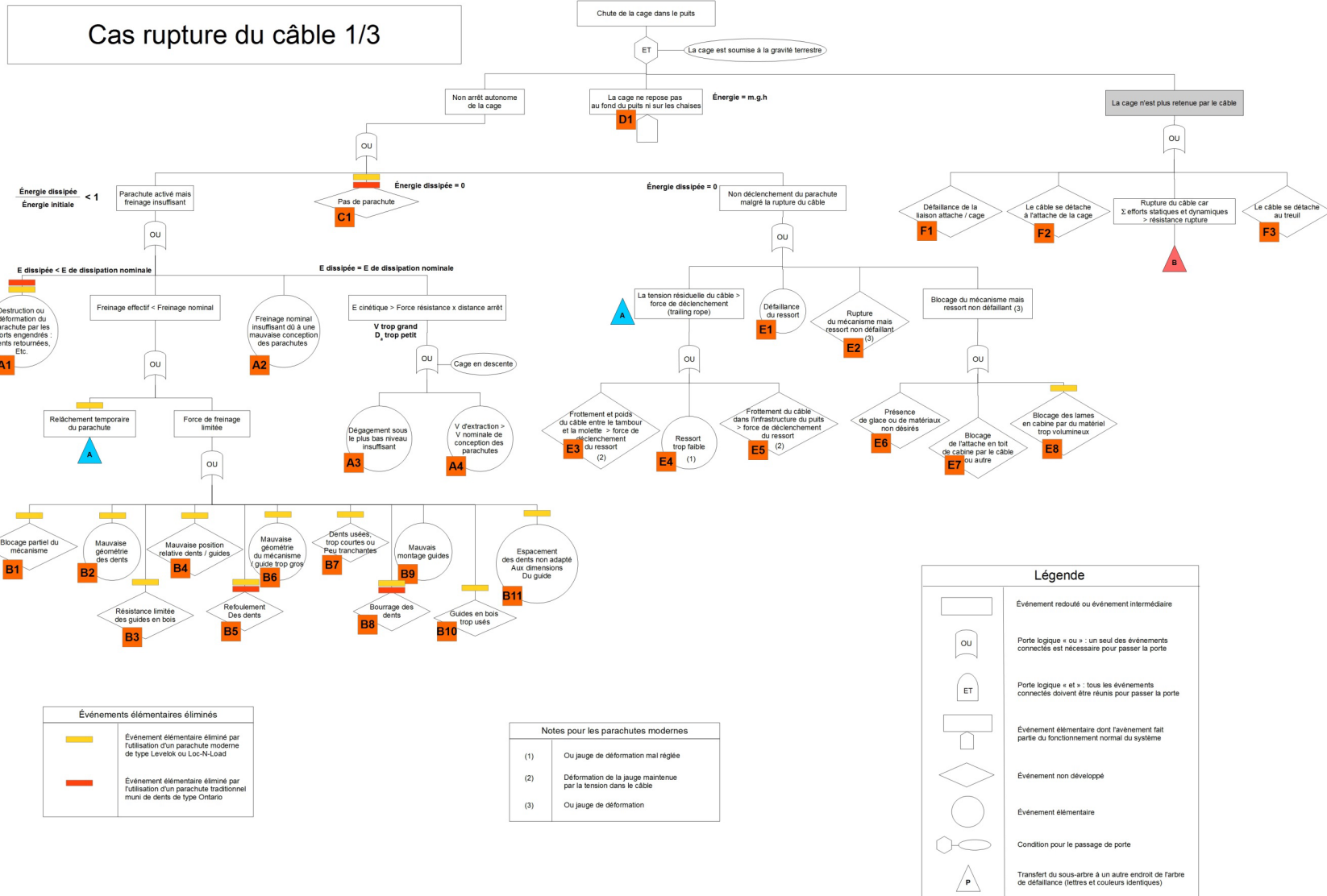
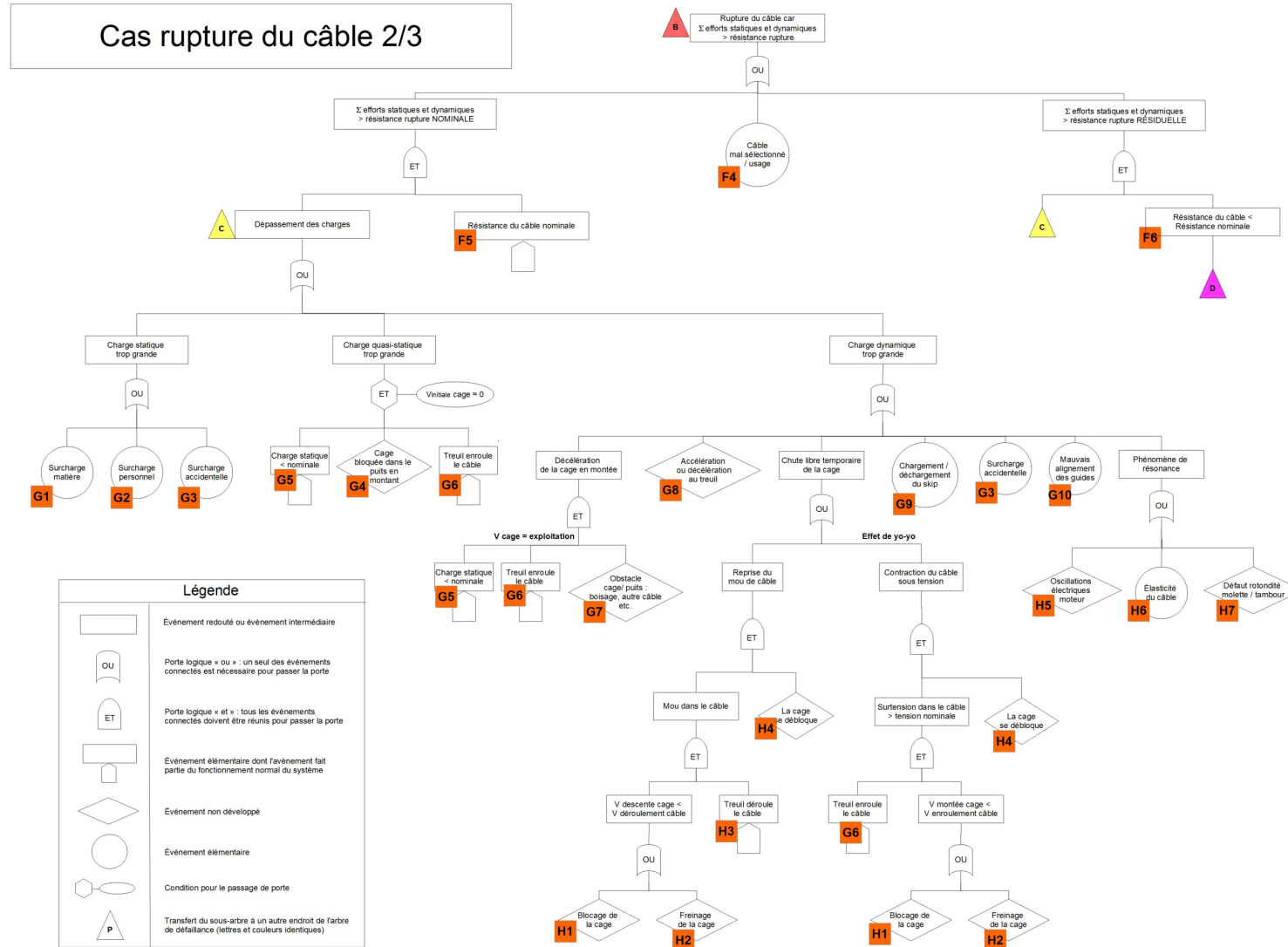


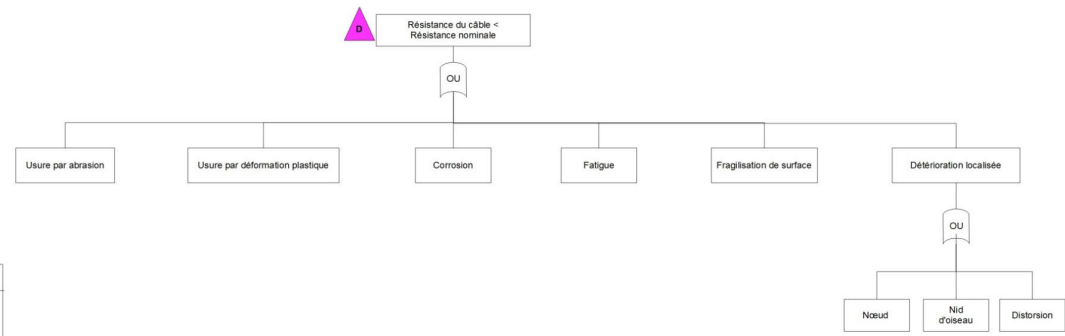
Figure 42. Résistance moyenne en fonction de la décélération (et résistance moyenne ajustée par rapport à la profondeur réelle des dents, au lieu du 1 po nominal).

**ANNEXE VI :  
ARBRES DE DÉFAILLANCE**





Cas rupture du câble 3/3



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)