

Sécurité des machines d'extraction commandées par des systèmes programmables électroniques

Annexe

Laurent Giraud
Bertrand Galy
Louis Germain
Réal Bourbonnière

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

RA-1049

NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

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

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

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

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

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

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2019
ISBN : 978-2-89797-055-0
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
mai 2019

Sécurité des machines d'extraction commandées par des systèmes programmables électroniques

Annexe

Laurent Giraud, Bertrand Galy
IRSST

Louis Germain
CanmetMINES

Réal Bourbonnière
Consultant

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

RA-1049



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.



ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette étude, du présent rapport annexe et de la fiche technique associée, a été rendue possible grâce à la collaboration et à l'appui de plusieurs organismes, collaborateurs et spécialistes œuvrant dans le domaine minier. Nous tenons particulièrement à remercier les organisations et les personnes suivantes :

- M^{me} France Gauthier, M^{me} Guylaine Bourque et M. Mario St-Pierre, de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST);
- MM. Daniel Côté et Martin Côté de CanmetMINES;
- MM. Olivier Brisson, Daniel Gourde et Mario Gagnon de la mine Langlois (compagnie Nyrstar);
- MM. Martin Blanchette, Éric Dessureault, Brian Michaud et Marco Morin de la compagnie Goldcorp;
- MM. Benoit-Claude Auclair, Olivier Noël et Pierre-Luc Dufour de la compagnie Niobec;
- M. Alain Gilbert de la compagnie ABB;
- M. Christian Quirion de la compagnie Agnico Eagle;
- MM. Marc Robitaille et André Racicot du Syndicat des Métallos;
- M. Michel Girard de la compagnie ASDR;
- M. Pierre Simon de la compagnie lamGold;
- M. Bernard Mador de l'Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur minier;
- M. François Ouellet de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST).

SOMMAIRE

Avec l'évolution rapide des nouvelles technologies et la recherche de rentabilité des investissements, les systèmes électroniques programmables (PES) ont été implantés progressivement dans toutes les industries. Le secteur minier n'échappe pas à cette tendance et au fil du temps presque toutes les mines du Québec ont équipé leurs machines d'extraction de tels systèmes. Toutefois, l'introduction de ces nouvelles technologies, requises pour l'amélioration de la productivité minière au Québec, doit aller de pair avec la santé et la sécurité des travailleurs.

Une recension des machines d'extraction en service en 2016 au Québec a montré que le portrait général de l'industrie a évolué depuis la publication de la première version de la fiche technique RF-412, en 2005 : la grande majorité des machines d'extraction sont contrôlées et supervisées par des PES et près du tiers des machines d'extraction sont en opération depuis moins de 10 ans. D'autre part, de nombreuses machines d'extraction anciennes ont vu leur système de commande être mis à jour. À la lumière de ces observations, et des incidents survenus dans les dernières années, il apparaissait nécessaire de proposer une nouvelle version de la fiche technique RF-412, tenant compte à la fois de la situation actuelle au Québec (des disparités encore importantes entre les machines les plus modernes et les plus anciennes), et des tendances de l'industrie (augmentation des charges et de la vitesse d'extraction, systèmes de plus en plus automatisés).

Ce rapport annexe fait état de la démarche et de la réflexion ayant mené à la rédaction de la nouvelle fiche technique RF-1049. Celle-ci a été élaborée de concert avec des experts en machine d'extraction et des spécialistes en sécurité des machines. Bien qu'une partie importante de son contenu soit issue de la fiche technique RF-412, la mise à jour du document a permis de revoir sa structure et son organisation afin de reproduire autant que possible le découpage de l'information que l'on peut retrouver dans les normes internationales. La réflexion sous-jacente à la rédaction de cette nouvelle fiche était de concilier à la fois l'état actuel des machines d'extraction en service, tout en permettant une évolution vers plus d'automatisation et une intégration des pratiques modernes relatives à la robustesse (ou à la fiabilité) des systèmes de commande des futures machines d'extraction.

Cette nouvelle fiche technique RF-1049 contient les règles de l'art actuelles relativement à la fiabilité des PES et leur utilisation pour la commande de machines d'extraction. Elle est destinée aux utilisateurs, aux propriétaires et aux concepteurs de machines d'extraction commandées par des PES. Elle recense les informations sur les objectifs à atteindre en matière de sécurité des systèmes pour les machines d'extraction commandées par PES. Ce document ne soustrait pas le concepteur, ou l'utilisateur, à l'obligation de se conformer à toutes exigences légales ou réglementaires liées à leurs activités.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE	III
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XI
ANNEXE A : MÉTHODOLOGIE.....	1
A.I Bilan des installations	1
A.II Revue de la littérature.....	2
A.III Analyse du risque générique pour les machines d'extraction	3
A.IV Synthèse des données et rédaction de la nouvelle fiche technique associée.....	4
ANNEXE B : STATISTIQUES SUR LE PARC DE MACHINES D'EXTRACTION EN SERVICE AU QUÉBEC.....	5
B.I Puits	5
B.II Machine d'extraction	5
B.III Type de transporteur et vitesse d'extraction.....	7
B.IV Systèmes de freinage	8
B.V Commande	9
B.VI Bilan général pour la province.....	10
ANNEXE C : ÉVOLUTION DES MACHINES D'EXTRACTION ET DES PRATIQUES MINIÈRES AU QUÉBEC	11
C.I Évolution technologique des machines d'extraction	11
C.I.I Commande par automates programmables.....	11
C.I.II Contrôleur de vitesse.....	12
C.I.III Circuit de sécurité.....	13
C.I.IV Passage aux moteurs à courant alternatif.....	13
C.I.V Évolution des freins	14
C.I.VI Consoles d'opération.....	15
C.I.VII Commande en mode ascenseur et commande à distance	15
C.II Code de signaux visuels et sonores.....	15
C.III Facteur de sécurité du câble d'acier et normes sud-africaines.....	16
C.IV Inspections annuelles	17

ANNEXE D : NORMES ET RÉGLEMENTS RELATIFS À LA GESTION DU RISQUE ET AUX SRECS	19
D.I Contexte réglementaire et normatif au Québec, au Canada et aux États-Unis concernant les machines d'extraction	19
D.I.I Norme CSA M421	19
D.I.II Recommandations du NIOSH.....	21
D.II Les normes relatives aux systèmes de commande.....	22
D.II.I ISO 13849 (systèmes de commande des machines).....	23
D.II.II CEI 61508, 61511 et 62061.....	23
D.II.III Unification des deux normes	25
D.III Niveaux de contribution à la réduction du risque (SIL ou PL).....	25
D.III.I Selon la norme ISO 13849-1	26
D.III.II Selon les normes CEI 61511 et CEI 62061.....	26
D.III.III Équivalence SIL et PL	28
ANNEXE E : ANALYSE DU RISQUE	29
E.I Introduction.....	29
E.II Méthodologie	30
E.III Analyse du risque formelle.....	31
E.III.I Sources d'information et liste des fonctions de sécurité initiales	31
E.III.II Liste des phénomènes dangereux et des mesures de prévention	32
E.III.III Séance d'analyse du risque avec les experts	32
E.IV Résultats.....	34
E.IV.I Fonctions de sécurité	34
E.IV.II SIL.....	35
BIBLIOGRAPHIE	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Règlements provinciaux citant la norme CSA M421	20
Tableau 2.	Indépendance des personnes responsables de l'évaluation de la sécurité fonctionnelle des systèmes E/E/PE concernés par la sécurité	25
Tableau 3.	Niveaux de performance (PL) de la norme ISO 13849-1	26
Tableau 4.	Définition des SIL selon le mode de sollicitation	27
Tableau 5.	Équivalence SIL et PFHD.....	28
Tableau 6.	Participants à l'analyse du risque	33
Tableau 7.	Fonction de sécurité « limitation de la course verticale du transporteur »	36
Tableau 8.	Fonction de sécurité « protection des moyens de freinage »	37
Tableau 9.	Fonction de sécurité « protection du fonctionnement »	38
Tableau 10.	Fonction de sécurité « éviter une collision du transporteur avec tout obstacle dans le puits »	39
Tableau 11.	Fonction de sécurité « éviter une collision du transporteur avec tout obstacle dans le puits » (suite)	40
Tableau 12.	Fonction de sécurité « empêcher tous déplacements du transporteur dans une zone inondée du puits »	41
Tableau 13.	Fonction de sécurité « prévention de la rupture du câble »	41
Tableau 14.	Fonction de sécurité « prévention de la rupture du câble » (suite).....	42

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Âge et profondeur des puits.	5
Figure 2.	Type et âge de la machine d'extraction.	6
Figure 3.	Âge de la partie mécanique et du système de commande.	6
Figure 4.	Type de transporteur, capacité et vitesse d'extraction.	7
Figure 5.	Vitesse maximale du transporteur en fonction de la profondeur du puits.	8
Figure 6.	Systèmes de freinage.	9
Figure 7.	Systèmes de commande.	10
Figure 8.	Guides publiés par le NIOSH.	22
Figure 9.	Domaine d'application des normes CEI et ISO.	23
Figure 10.	Structure normative.	24

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AC :	courant alternatif (<i>alternating current</i>)
CEI :	Commission électrotechnique internationale
CNESST :	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
CSA :	Canadian Standards Association (Association canadienne de normalisation)
DC :	courant continu (<i>direct current</i>)
E/E/PE :	électrique/électronique/électronique programmable (<i>electric/electronic/programmable electronic</i>)
IRSST :	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
ISO :	International Organization for Standardization (Organisation internationale de normalisation)
LSST :	Loi sur la santé et la sécurité du travail
MSHA :	Mine Safety and Health Administration
NIOSH :	National Institute for Occupational Safety and Health
PES :	système électronique programmable (<i>programmable electronic system</i>)
PFHD :	probabilité de défaillance dangereuse par heure
PL :	niveau de performance (<i>performance level</i>)
RSSM :	Règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines
RSST :	Règlement sur la santé et la sécurité du travail
SABS :	South African Bureau of Standards (Bureau de normalisation d'Afrique du Sud)
SIL :	niveau d'intégrité de sécurité (<i>safety integrity level</i>)
SIS :	système instrumenté de sécurité
SRECS :	système de commande électrique relatif à la sécurité (<i>safety related electric control system</i>). Note : le circuit de sécurité « traditionnel » fait partie du SRECS
SRP/CS :	partie d'un système de commande relative à la sécurité (<i>safety-related part of a control system</i>)

ANNEXE A : MÉTHODOLOGIE

L'objectif de cette activité de recherche était de mettre à jour la fiche technique RF-412 dans le but d'améliorer la sécurité des travailleurs ayant à intervenir ou utilisant les cages des machines d'extraction commandées par des systèmes électroniques programmables (PES). Cela a permis de prendre en considération les évolutions et le retour d'expérience des normes sur la sécurité et la fiabilité des systèmes de commande, ainsi que l'évolution des pratiques minières, dont l'automatisation des machines d'extraction et l'obsolescence d'une partie du matériel présentement utilisé (Lilly, PES, relais électromécaniques, etc.). Ces travaux ont également permis de supprimer des zones grises qui laissaient place à l'interprétation de certaines recommandations, et finalement d'inclure dans ce rapport annexe les résultats d'une analyse du risque formelle permettant d'ajuster les mesures de maîtrise du risque.

La méthodologie utilisée pour atteindre cet objectif est présentée dans ce rapport annexe.

A.1 Bilan des installations

La première partie de l'activité de recherche a consisté à récolter de l'information sur les installations minières québécoises et les systèmes de commandes utilisés pour les machines d'extraction afin d'estimer le plus justement possible la variabilité des systèmes de commande utilisés (électromécaniques, électroniques, électroniques programmables) ainsi que la variabilité des systèmes instrumentés de sécurité (ou circuit de sécurité) prescrits par la réglementation (RSSM, 2018).

La majorité des renseignements suivants ont été colligés grâce à la base de données compilée par le technologue Louis Germain dans le contexte de ses activités à CanmetMINES :

- Âge de la machine d'extraction (partie mécanique);
- Date et objet de la dernière rénovation majeure du système de commande;
- Identification du type de charge suspendue : cage/skip/cage-skip;
- Nombre maximal de travailleurs autorisés dans la cage;
- Identification du type de commande : commandes mécaniques, analogiques, numériques (PES de commande);
- Identification du type de contrôleur de bon fonctionnement ou de supervision :
 - Lilly/PES de supervision;
 - mode de fonctionnement du PES de supervision, si existant;
 - paramètres supervisés (position du transporteur, vitesse, accélération, etc.) et valeurs limites;
- Est-ce qu'il existe une analyse du risque écrite de la machine d'extraction?
- Description du ou des circuits de sécurité :
 - schéma unifilaire;
 - liens avec le PES de commande;
 - liens avec le PES de supervision;

- réalisation du module de décision du circuit de sécurité : analogique, numérique, etc.;
- paramètres, capteurs ou informations pris en compte (évite-molette, par exemple);
- Description du type d'actionneurs du circuit de sécurité (freins d'urgence) :
 - Sont-ils supervisés?
 - Si supervision : comment est-elle réalisée?

Trois visites préliminaires ont été planifiées par l'équipe de recherche pour ajuster la grille de collecte d'information et récolter des informations supplémentaires sur place. Ces visites préliminaires ont permis d'observer une ancienne machine d'extraction avec un Lilly, une machine d'extraction très récente avec plusieurs PES et une machine d'âge intermédiaire dont le système de commande a été modifié au cours du temps.

La description de la structure organisationnelle entourant la machine d'extraction des entreprises a été réalisée uniquement lors des visites de mines. Des variations importantes d'une mine à l'autre ont été observées. La structure générale pour l'entretien et la supervision de la machine d'extraction semblait relativement floue et montrait une certaine porosité entre plusieurs services (entretien mécanique général, entretien électrique général, service responsable des systèmes de mesure).

Le bilan des machines d'extraction en 2016 au Québec a servi de base pour ajuster les prescriptions et recommandations de la fiche technique afin de proposer des solutions réalistes tout en étant sécuritaires. Les principales statistiques sur le parc de machines d'extraction du Québec sont présentées à la sous-section B.

A.II Revue de la littérature

La revue de la littérature couvre un grand nombre de points et tous les membres de l'équipe de recherche ont pris part à sa réalisation, aidés par les employées du Centre de documentation de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST). La revue de la littérature a porté notamment sur :

- Les recommandations et exigences actuellement en vigueur dans l'industrie minière relatives aux PES, dans les juridictions autres que le Québec (provinces et territoires du Canada, Afrique du Sud, États-Unis, Australie). Une partie des références nécessaires a été rassemblée lors de la réalisation d'une expertise portant sur la modernisation des parachutes de transporteurs de mines et des trois articles qui en ont découlé (Galy et Giraud, 2016a, 2016b; Giraud et Galy, 2018);
- Les normes de sécurité des machines et les normes des systèmes de commande, ainsi que la norme CSA M421 sur l'utilisation de l'électricité dans les mines;
- Les travaux de recherche récents (sur la période des dix années s'étant écoulées depuis la publication de la fiche RF-412), portant notamment sur les systèmes de commande et de freinage, la surveillance (*monitoring*) des cycles de production, etc.;
- Les méthodes d'estimation et d'évaluation du risque qui permettent de juger de l'adéquation entre les mesures de maîtrise des risques mises en œuvre et le niveau de risque visé;

- L'évolution des machines d'extraction, en particulier le passage de systèmes de commande électromécaniques à informatiques;
- Les travaux de recherche et les recommandations formulées par le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) sur les PES dans le milieu minier;
- Les méthodes d'évaluation globale de la sécurité des systèmes : couches de sécurité, lignes de défense (organisationnelles, structurelles...), concept de défense en profondeur (Garbolino et Guarnieri, 2012; Iddir, 2012a, 2012b, 2014).

La revue de la littérature a permis d'une part d'identifier les normes applicables aux systèmes de commande de machines d'extraction et, d'autre part, de voir comment les législateurs des autres provinces ou pays ont pris en compte l'évolution de ces normes (Galy et Giraud, 2016b). Les avancées technologiques et normatives des dix dernières années ont servi à déterminer les tendances émergentes concernant les systèmes de commande et de supervision des machines d'extraction et ont permis de formuler des recommandations qui devraient être viables pour quelques années encore.

La partie de la revue de la littérature portant sur l'évolution des machines d'extraction est présentée à la sous-section annexe C, et s'appuie également sur la riche expérience des machines d'extraction de Louis Germain.

La partie de la revue de la littérature sur les normes et règlements relatifs à la sécurité des machines est présentée à la sous-section D.

A.III Analyse du risque générique pour les machines d'extraction

Comme mentionné dans la fiche technique RF-412, l'analyse du risque initiale « était basée sur une analyse informelle des risques et fondée sur l'expérience aussi bien des utilisateurs que des fabricants et des inspecteurs de la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST)¹ ». Or, compte tenu de l'évolution des technologies et des accidents récents, il apparaissait souhaitable de baser la mise à jour de la fiche technique sur une analyse du risque générique plus formelle afin de mieux cerner les problématiques liées aux nouvelles technologies utilisées et d'estimer le plus précisément possible les probabilités de défaillance des moyens de maîtrise du risque utilisés pour garantir la sécurité des machines d'extraction actuellement en service au Québec. Par générique, nous entendons que l'analyse du risque réalisée par l'équipe de recherche peut s'appliquer à la majorité des machines d'extraction utilisées dans les mines au Québec, en ajustant certains facteurs.

Les documents de référence proposés à ce sujet au moment de la rédaction de la fiche RF-412 en 2005 sont maintenant bien connus, certains ayant même fait l'objet de mises à jour. Notamment, la norme ISO 12100 (2010) a remplacé la norme ISO 14121 (2007) et propose une méthode structurée d'appréciation du risque qui pourrait être utilisée. Cette méthode prescrit de réaliser, dans un premier temps, une analyse du risque comprenant elle-même les étapes de détermination des limites de la machine, d'identification des phénomènes dangereux et d'estimation du risque. À la suite de l'analyse du risque, l'évaluation du risque permet de porter

¹ La CSST est devenue la CNESST en juin 2015 après son regroupement avec la Commission de l'équité salariale et la Commission des normes du travail.

un jugement sur la sécurité de la machine. La combinaison de ces deux étapes est appelée l'appréciation du risque.

Appréciation du risque (ISO12100):

1. Analyse du risque :
 - a. Détermination des limites de la machine;
 - b. Identification des phénomènes dangereux;
 - c. Estimation du risque (détermination du niveau du risque);
2. Évaluation du risque (jugement porté sur la sécurité de la machine).

Comme ce fut le cas lors de la rédaction de la fiche RF-412, la démarche d'analyse s'est appuyée sur l'expérience des intervenants. De plus, les visites réalisées par l'équipe de recherche pour effectuer le bilan des machines d'extraction ont permis d'alimenter la collecte d'information nécessaire à la réalisation de cette analyse du risque générique.

L'analyse du risque qui a été menée ainsi que la méthodologie détaillée sont présentées à la sous-section E.

A.IV Synthèse des données et rédaction de la nouvelle fiche technique associée

Une fois toutes les données recueillies et l'analyse du risque générique effectuée, la nouvelle fiche technique associée à ce rapport annexe a été rédigée. Cette nouvelle fiche technique contient :

- une introduction et l'explication du domaine d'application;
- une liste de définitions;
- les principes généraux prescrits et recommandés pour la structure générale des systèmes de commande et de supervision d'une machine d'extraction, avec notamment deux figures illustrant la structure générale, actuelle et future, des systèmes de commande et de supervision d'une machine d'extraction;
- une liste de fonctions de sécurité avec les essais et vérifications périodiques associées;
- des exigences techniques relatives aux PES de commande ou de supervision ainsi qu'au système de commande électrique relatif à la sécurité (SRECS);
- des exigences procédurales et organisationnelles;
- une liste de documents de référence.

ANNEXE B : STATISTIQUES SUR LE PARC DE MACHINES D'EXTRACTION EN SERVICE AU QUÉBEC

En 2016, il y avait 19 puits de mine en service au Québec. Sur ces 19 puits, un seul puits est équipé d'une machine d'extraction de type Blair et deux puits sont équipés d'une machine d'extraction à poulie d'adhérence. Tous les autres sont munis d'une machine d'extraction à tambour (simple ou double). Cette annexe donne un aperçu des caractéristiques des machines d'extraction.

B.I Puits

Parmi les 19 puits de mine en exploitation, six d'entre eux (31,6%) ont été creusés avant 1990, 10 entre 1990 et 2010 (52,6%), et les trois derniers après 2010 (15,8 %) (Figure 1). La majorité de ces puits ont une profondeur située entre 1500 et 3000 pieds (53 %) (Figure 1). La profondeur des autres puits est de moins de 1500 pieds (11 %), de 3000 à 4500 pieds (26 %) ou de plus de 4500 pieds (11 %).

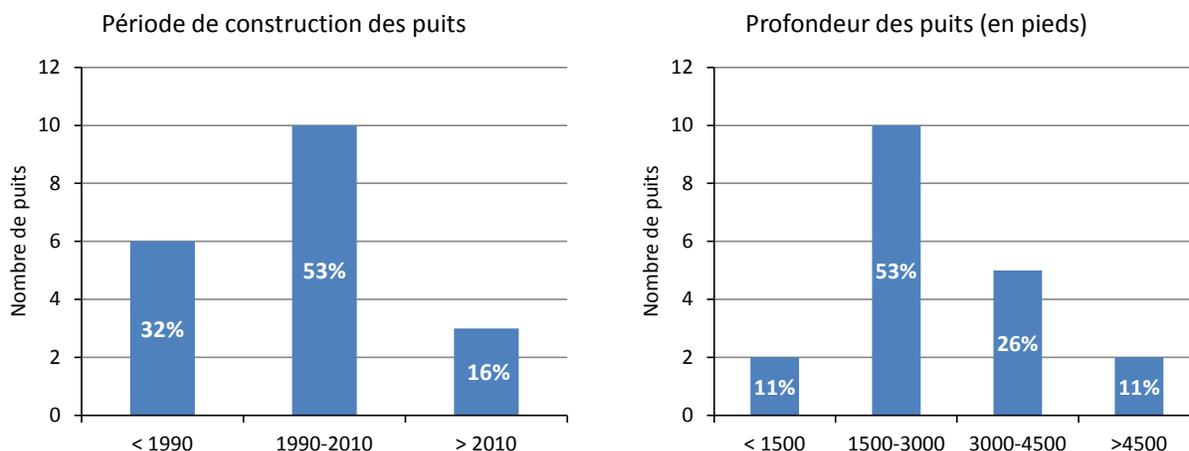


Figure 1. Âge et profondeur des puits.

B.II Machine d'extraction

En 2016, au moment du recueil des données, il y avait 31 machines d'extraction en service au Québec pour lesquelles la partie mécanique de ces machines datait de 1929 à 2015 (Figure 2). Il convient de noter que le nombre de machines d'extraction est plus élevé que le nombre de puits, car un puits peut être équipé de plus d'une machine d'extraction (voir sous-section C.I).

Les intervalles de temps pour l'âge de la machine d'extraction ne sont pas continus, car il y a des périodes au cours desquelles aucune nouvelle machine d'extraction n'a été installée : par exemple, il n'y a pas de machine d'extraction ayant une partie mécanique datant de la période 1993-2007 (Figure 2).

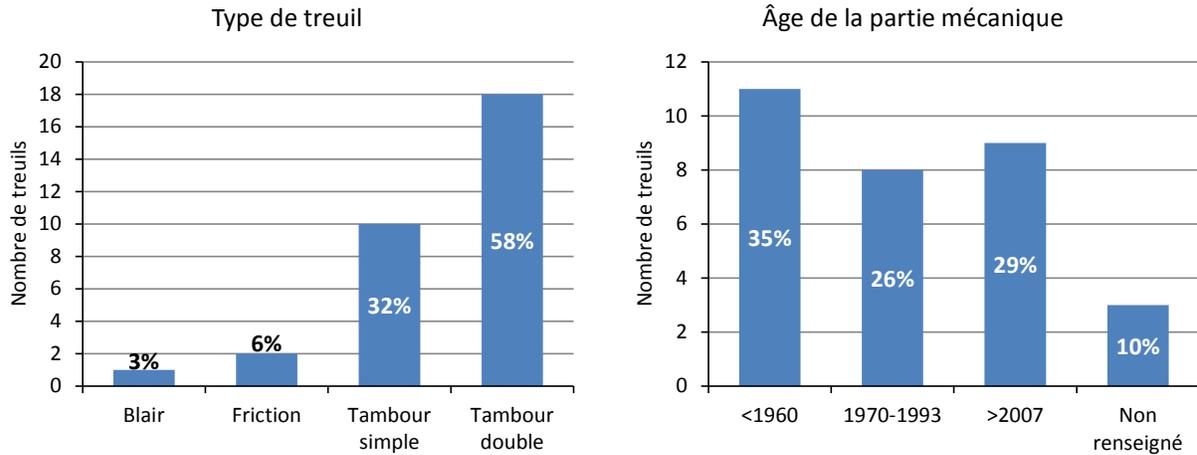


Figure 2. Type et âge de la machine d'extraction.

Certaines machines d'extraction ont une partie mécanique relativement vieille, mais leur système de commande a été mis à jour. Il est donc possible de rencontrer une machine des années 60 ou 70, avec un PES très récent (Figure 3). Dans la Figure 3, les trois losanges à l'extrémité droite représentent des machines d'extraction dont l'âge de la partie mécanique n'est pas connu précisément (mais ce sont des machines de seconde main, donc d'un certain âge).

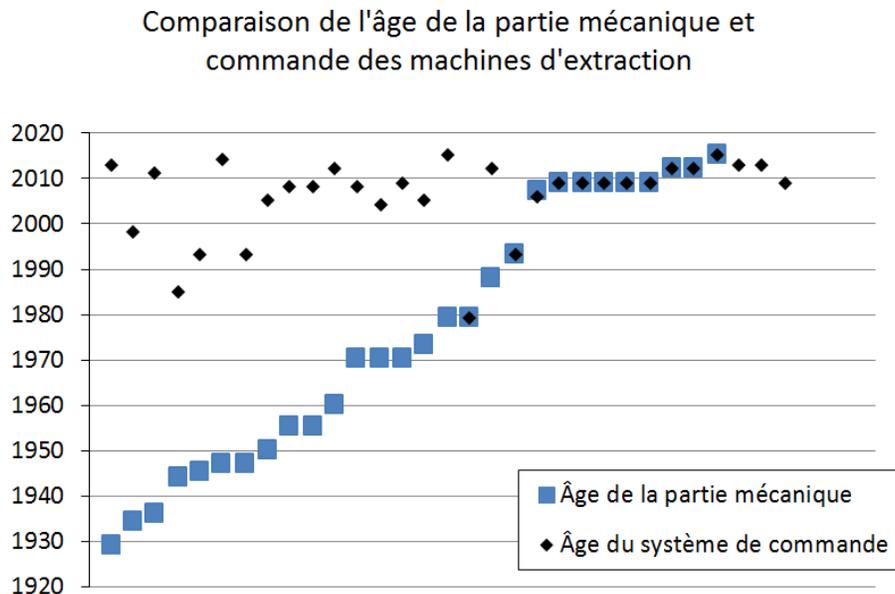


Figure 3. Âge de la partie mécanique et du système de commande.

B.III Type de transporteur et vitesse d'extraction

Les intervalles du nombre de personnes que la cage peut contenir ne sont pas continus, car il y a des capacités de cage qui ne sont pas représentées au Québec : par exemple, il n'y a pas de cage ayant une capacité de 80 personnes (Figure 4).

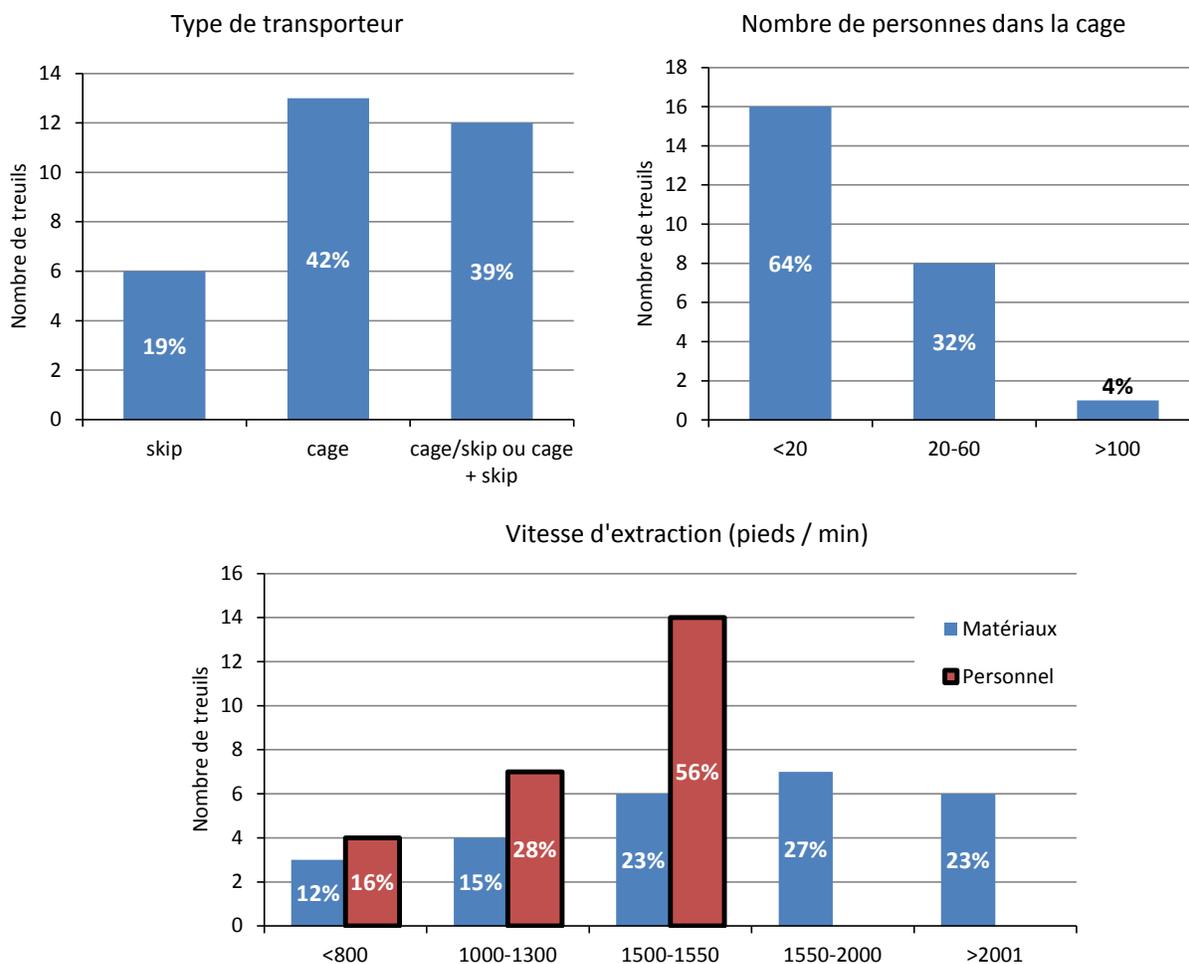


Figure 4. Type de transporteur, capacité et vitesse d'extraction.

Le graphique de la vitesse maximale d'extraction en fonction de la profondeur du puits (Figure 5) montre une tendance nette à la hausse pour la vitesse d'extraction des matériaux lorsque les puits sont plus profonds. À l'inverse, quelle que soit la profondeur du puits, la vitesse d'extraction du personnel est limitée aux alentours de 1500 pieds par minutes (le maximum autorisé par le Règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines (RSSM) est de 8 m/s, soit 1574 pieds/min, si on ne veut pas procéder aux essais réglementaires de l'article 242).

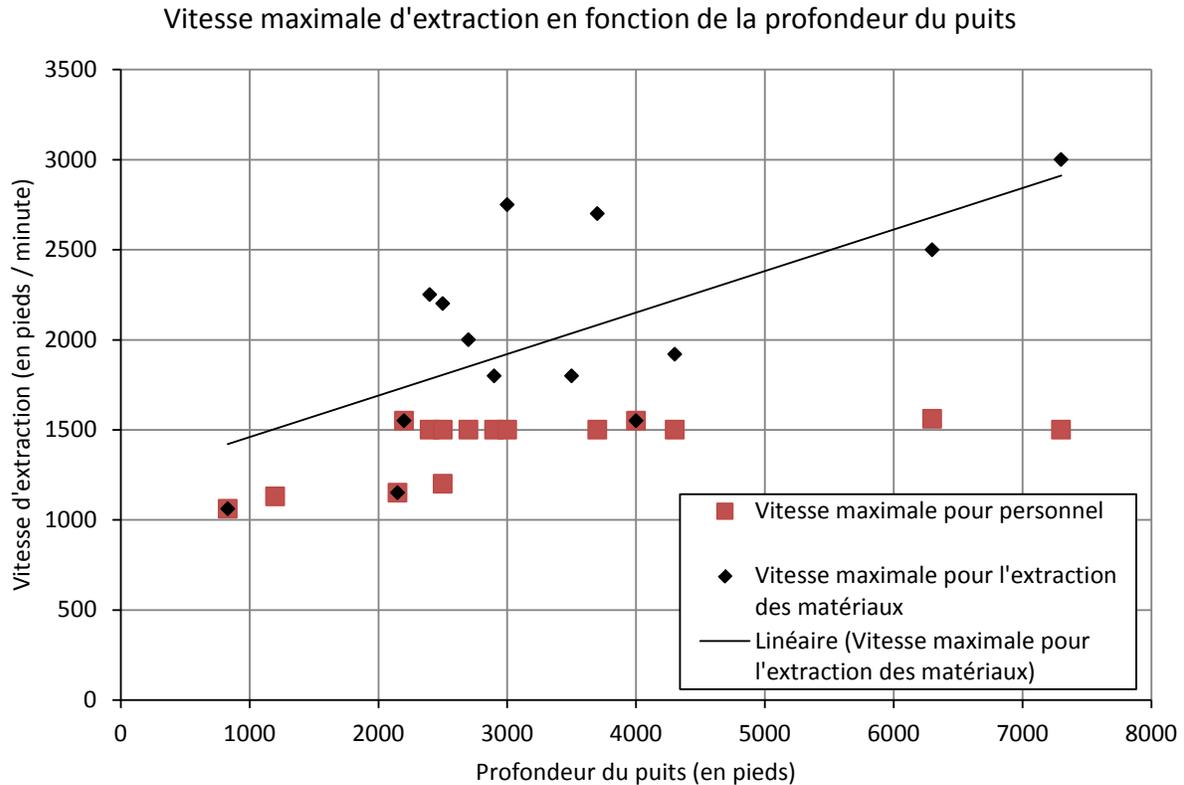


Figure 5. Vitesse maximale du transporteur en fonction de la profondeur du puits.

B.IV Systèmes de freinage

La Figure 6 détaille les différents types de freins utilisés (disques ou montants parallèles), la régulation² du frein d'urgence, le nombre de systèmes de freins d'urgence ainsi que les moyens physiques d'application des freins d'urgence (ressort, gravité terrestre ou air comprimé)³.

² Un freinage progressif fait référence à un système de freinage taré pour limiter la décélération en deçà de la valeur limite imposée par le RSSM. Un freinage régulé fait référence à un système de freinage calculant en continu la décélération de la cage et ajustant la force de freinage par l'intermédiaire d'une boucle de régulation.

³ Pour plus de détails sur les moyens de freinage, voir le *Guide sur les machines d'extraction* publié par la CNESST (https://www.cnesst.gouv.qc.ca/publications/200/Pages/dc_200_16121.aspx).

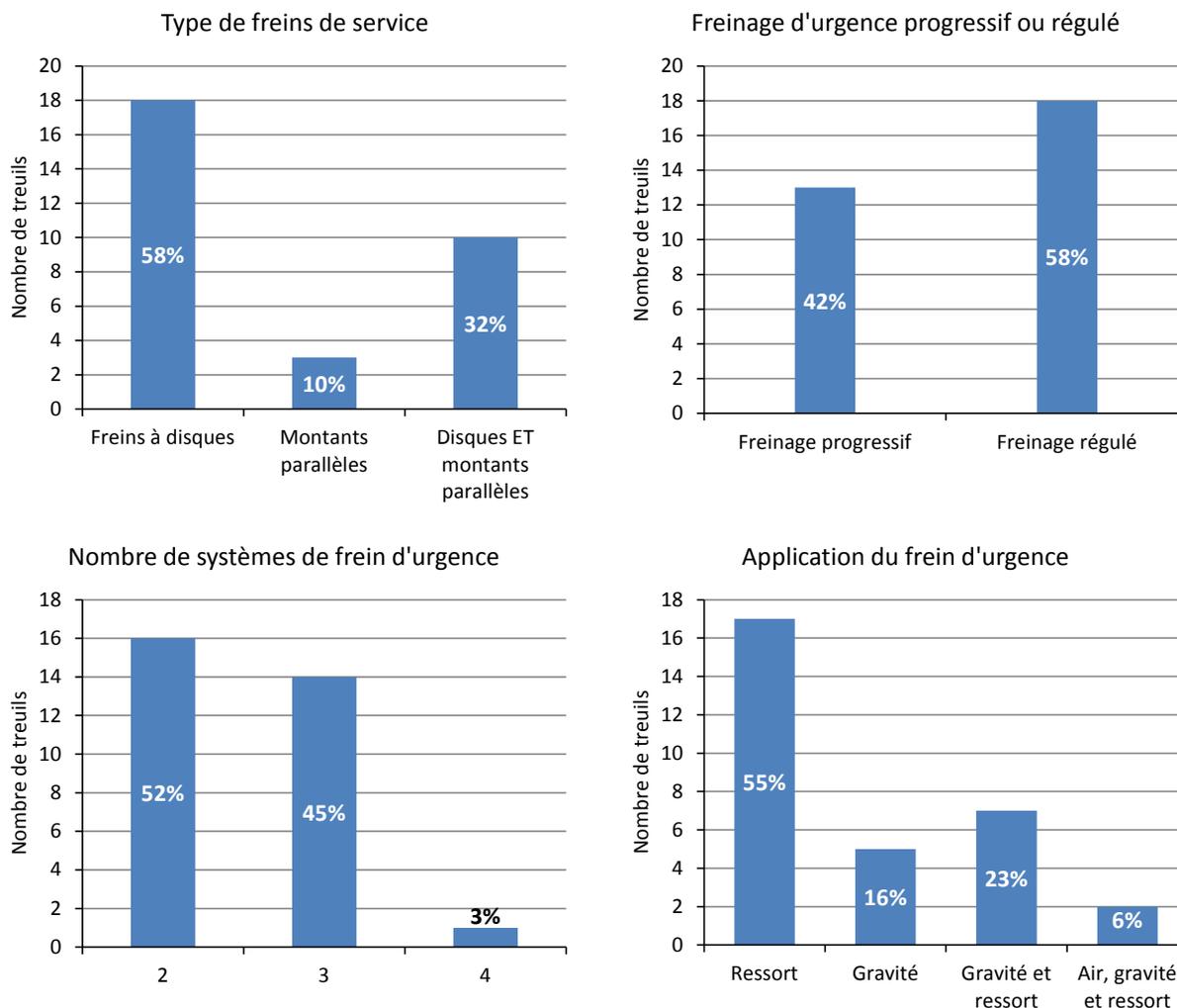


Figure 6. Systèmes de freinage.

B.V Commande

La Figure 7 détaille les différents types de commandes utilisés pour les machines d'extraction (relais électromécaniques, PES analogiques ou numériques), le type de supervision utilisé (mécanique ou électronique à l'aide d'un PES) ainsi que le nombre de modes de fonctionnement disponibles. Il convient de noter que les modes de fonctionnement mentionnés varient beaucoup d'une mine à l'autre et d'un fabricant de machine d'extraction à l'autre.

En 2016, la majorité des machines d'extraction était contrôlée par un PES (Figure 7), et la supervision était également assurée par un PES dans la majorité des cas, en lieu et place du traditionnel contrôleur mécanique qui a tendance à disparaître.

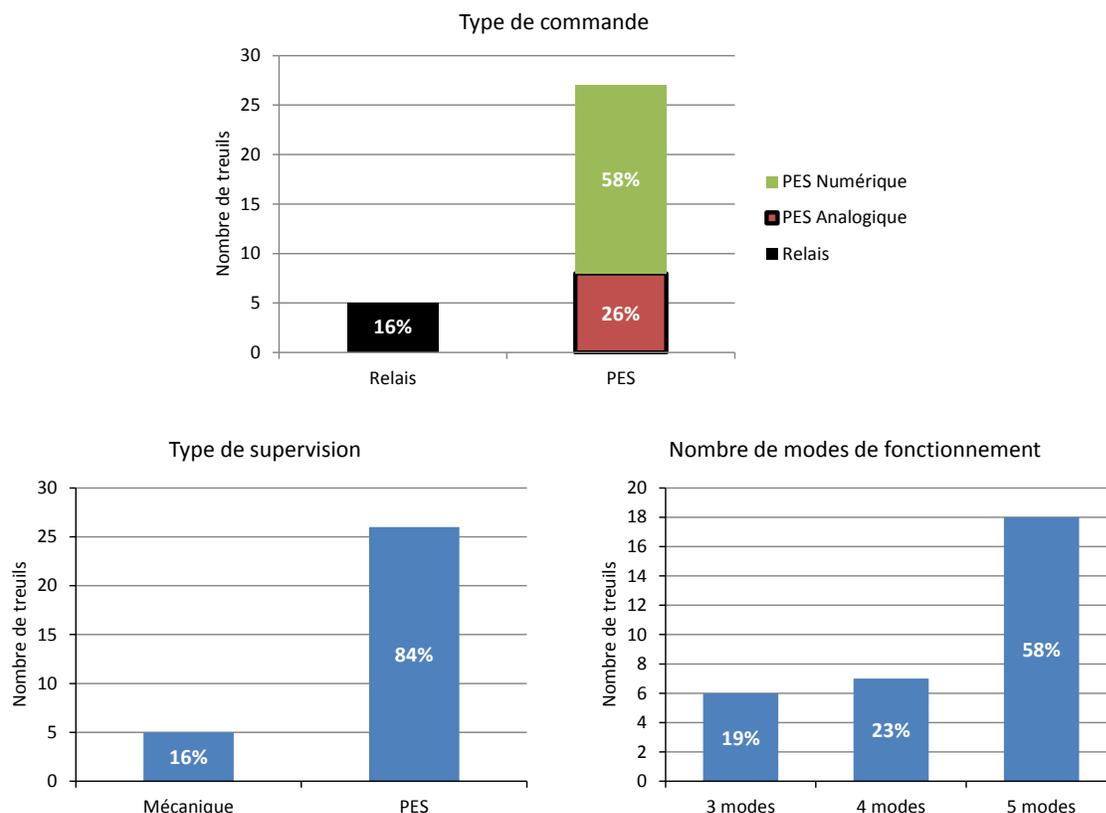


Figure 7. Systèmes de commande.

B.VI Bilan général pour la province

Depuis la publication de la première version de la fiche technique RF-412, le portrait des machines d'extraction a évolué au Québec :

- La grande majorité des machines d'extraction sont contrôlées et supervisées par des PES;
- Un pourcentage non négligeable des machines d'extraction est très récent (moins de 10 ans);
- Le système de commande de nombreuses machines d'extraction anciennes a été mis à jour;
- La vitesse d'extraction reste limitée autour de 1 500 pieds par minute pour le personnel (réglementation), mais des machines à grande vitesse commencent à apparaître, avec des puits très profonds;
- Le système de freins à disque est aujourd'hui le système de freinage le plus courant et remplace peu à peu les traditionnels freins à montants parallèles;
- La majorité des machines d'extraction sont équipées d'un système de freinage régulé, permettant de limiter la force dans le câble, en cas d'arrêt d'urgence;
- Il n'y a pas de relation directe entre l'âge d'un puits ou d'une machine d'extraction, et le type de système de freinage ou de commande qui équipe la machine.

ANNEXE C : ÉVOLUTION DES MACHINES D'EXTRACTION ET DES PRATIQUES MINIÈRES AU QUÉBEC

Depuis que les mines souterraines sont exploitées, elles ont presque toutes été associées à des machines d'extraction pour rentabiliser le hissage du minerai à la surface. Ces machines d'extraction sont indispensables pour rendre les activités souterraines efficaces lorsque la profondeur dépasse 300 mètres (1 000 pieds) de profondeur. Le nombre et la grosseur de ces machines n'ont cessé d'évoluer depuis des décennies.

Le diamètre des tambours des machines d'extraction dans les années 30 à 50 était en général de 2,4 mètres (8 pieds) ou moins. Le seul câble par tambour ne permettait guère des puits plus profonds que 760 mètres (2 500 pieds). Dans les années 50 à 90, la dimension des tambours a atteint jusqu'à 4,3 mètres (14 pieds) et elle donnait la possibilité d'atteindre des profondeurs jusqu'à 1 220 mètres (4 000 pieds). Par la suite, dans les années 90, une première machine avec un tambour de 4,9 mètres (16 pieds) de diamètre a été installée, permettant encore une fois d'atteindre de plus grandes profondeurs (plus de 1 220 mètres), tout en engendrant d'autres problèmes techniques associés avec cet approfondissement. Les plus gros tambours installés au Québec sont maintenant de 6,4 mètres (21 pieds) de diamètre et la première machine de cette dimension a été installée en 2010.

C.1 Évolution technologique des machines d'extraction

Les machines d'extraction servent au transport des travailleurs, du matériel et pour le hissage du minerai. Un puits de mine de plus de 30 mètres (100 pieds) de profondeur doit être muni d'un compartiment servant exclusivement au transport du personnel. Anciennement, il s'agissait d'échelles (*manway*) ou d'escaliers, mais aujourd'hui il s'agit d'une installation motorisée de transport de personne (*Mary-Ann*, ou Marianne). De nos jours, un puits peut contenir trois machines d'extraction différentes : une pour le service exclusif du personnel (installation motorisée de transport de personne), une pour le service du personnel et du matériel et une troisième pour le hissage du minerai. Le puits de la mine est alors divisé en 4 ou 5 compartiments et chacune des machines circule dans son ou ses compartiments. Le ou les compartiments de deux machines d'extraction partageant un même puits sont isolés les uns des autres.

L'automatisation des machines d'extraction permet d'optimiser les temps de cycles et de rentabiliser les opérations. Les compagnies minières doivent garder l'esprit ouvert face aux nouveaux développements technologiques tout en maintenant un haut niveau de sécurité de toute installation liée au transport du personnel et des matériaux ainsi qu'à l'extraction du minerai.

C.1.1 Commande par automates programmables

Au Québec, on trouve encore aujourd'hui des machines qui sont entièrement manuelles, c'est-à-dire que l'opérateur gère l'utilisation des freins et régule la vitesse durant tout le trajet des transporteurs. En plus de la manette de commande, ces machines, utilisant un moteur à rotor bobiné, sont équipées d'une ou deux manettes de freins de service qui sont actionnées par l'opérateur. Celui-ci doit gérer le départ et la destination ainsi que la régulation de la vitesse de

déplacement des transporteurs. Avant chaque mouvement des transporteurs, l'opérateur doit prendre en compte le déséquilibre entre les compartiments pour éviter des mouvements inverses et brusques. Ces machines requièrent une attention continue sur l'intensité du courant du moteur durant les déplacements. Les manœuvres et la concentration de l'opérateur d'une machine utilisant un moteur à rotor bobiné sont complètement différentes de celles d'une machine récente et automatisée.

Les machines installées récemment, soit depuis une quinzaine d'années, sont relativement semblables. Elles sont munies de dispositifs qui supervisent l'opérateur en tout temps au moyen d'automates programmables. Ces machines doivent contenir au moins deux PES dont un sert pour la commande et l'autre à la supervision des limites de déplacements. Les deux PES ont la possibilité d'ouvrir le circuit de sécurité et, par conséquent, d'enlever l'énergie au moteur et de faire appliquer les freins d'urgence. Le circuit de sécurité est extérieur aux PES. La manette de commande de la vitesse est fonctionnelle seulement si les conditions de démarrage sont remplies. Le PES de commande analyse la position des transporteurs par rapport aux limites de parcours du puits et il ajuste la vitesse d'opération en conséquence. En mode d'opération normal, de nombreuses limites préétablies par les concepteurs sont programmées dans le PES, ce qui confine l'opérateur à une gestion des points de départ et de destination des transporteurs.

La multiplication des protections développées avec les PES a fait en sorte qu'il a fallu introduire dans la réglementation, en 2005, une fiche technique sur la sécurité des machines d'extraction commandée par ces systèmes programmables (RF-412). À titre indicatif, vers le milieu des années 1990, il y avait seulement 3 machines d'extraction supervisées par un PES (Fortin et Demers, 2011). Aux alentours de 2005, plus de 60 % des machines d'extraction au Québec étaient équipées de PES de supervision (Paques et Germain, 2005) et en 2016, cette proportion se situe à 84 %.

C.1.1 ***Contrôleur de vitesse***

La réglementation québécoise exige que les machines d'extraction au Québec soient équipées d'un contrôleur de vitesse sur chacun des tambours. La fonction principale de ce dispositif est de fixer les limites de parcours du puits et de superviser la vitesse maximale dans ces limites. L'excès de vitesse doit être inférieur à 120 % de la vitesse maximale d'opération. Le premier de ces contrôleurs a été assemblé et breveté par Roybell en 1905; il était entraîné mécaniquement par des jeux d'engrenage avec le tambour. Sur certains aspects, il ressemblait au contrôleur Lilly d'aujourd'hui. Il était, par contre, beaucoup plus gros et ne remplissait qu'un petit nombre de fonctions.

Dans les années 80, les premiers PES faisaient leur apparition au Québec avec des fonctions d'encodeur établissant la position du trajet. Le premier superviseur de vitesse par PES utilisant des encodeurs a été installé en parallèle avec un contrôleur de vitesse mécanique de type Lilly modèle C en 1987 en vue de son remplacement. Depuis 1993, ces contrôleurs mécaniques sont remplacés graduellement par des PES et leurs encodeurs, au rythme des budgets de modernisation des machines d'extraction existantes. Les installations neuves sont maintenant toutes munies de PES.

C.I.III Circuit de sécurité

La réglementation québécoise exige que les machines d'extraction au Québec soient équipées d'un circuit de sécurité. Auparavant, soit avant l'arrivée des PES, ce circuit de sécurité était entièrement filé et tous les contacts résultant des protections étaient en série pour alimenter le relais principal. Le circuit de sécurité devait être alimenté en tout temps pour permettre un fonctionnement normal de la machine d'extraction. Ainsi, advenant une ouverture du circuit de sécurité (relais principal ouvert), celle-ci déclenchait le système de freinage d'urgence et ouvre l'alimentation du ou des moteurs.

Avec les PES, le principe de fonctionnement est similaire. Il y a un circuit d'urgence externe avec un relais principal qui doit être alimenté en tout temps pour permettre un fonctionnement normal de la machine d'extraction. Les deux contacts de chaque PES sont reliés en série avec les boutons d'arrêt d'urgence ainsi que quelques autres protections directement filées avec ce circuit d'urgence. Chacun des PES gère ses protections et prend en compte l'état du circuit d'urgence principal. Advenant une ouverture du circuit de sécurité (relais principal ouvert), celle-ci déclenche le système de freinage d'urgence et ouvre l'alimentation du ou des moteurs. Avec de multiples PES, le système de freinage contient généralement autant de canaux que le nombre de PES utilisés et chaque canal de freinage obéit à une consigne de décélération établie lors de la mise en service. La consigne de décélération est indépendante d'un PES à l'autre et, advenant une défaillance sur un canal de freinage, cela n'entraîne pas nécessairement une application complète du système de freinage.

C.I.IV Passage aux moteurs à courant alternatif

Les moteurs à courant alternatif (AC) asynchrone sont utilisés sur les nouvelles machines d'extraction; ainsi, 38 % des machines en fonction au Québec sont munies d'un moteur AC asynchrone. La nouvelle génération de convertisseurs AC-AC permet une bonne régulation à très basse vitesse.

Environ 45 % des machines en fonction au Québec sont munies d'un moteur à courant continu (DC). Ils sont tous accompagnés de convertisseurs AC-DC et on ne retrouve pas de configuration Ward Leonard pour la commande de vitesse. Un moteur DC combiné à un convertisseur a besoin d'un dispositif de sécurité supplémentaire en cas de panne du réseau électrique.

Les moteurs AC asynchrones et DC assurent l'accélération, le maintien à la vitesse constante et la décélération des tambours à des valeurs préprogrammées par le PES de commande. En situation normale, les freins de service s'appliquent par l'intermédiaire des PES et ils servent à garder la machine dans un état stationnaire entre les déplacements. La consigne maximale de vitesse est appliquée par le PES de commande au convertisseur et elle dépend, entre autres, de la position des transporteurs dans le puits. L'opérateur, même avec sa manette au maximum de vitesse, est limité en deçà de la protection d'excès de vitesse.

Les moteurs AC avec rotor bobiné asynchrone et résistances sont encore présents dans 16 % des machines en fonction au Québec. Ce type de moteur permet seulement un mode manuel et l'opérateur doit manœuvrer au moins deux manettes de commande. Pour les déplacements, il peut enlever les deux freins des tambours au moyen d'une manette et appliquer un torque aux

moteurs avec une autre manette. L'opérateur de la machine doit connaître le déséquilibre entre les compartiments pour anticiper le mouvement des transporteurs lorsqu'il enlève les freins de service.

Ainsi, l'opérateur pourrait facilement atteindre la protection d'excès de vitesse, particulièrement aux limites de parcours du puits. Il doit donc réguler la vitesse du moteur avant d'atteindre cette protection d'excès de vitesse.

C.I.V Évolution des freins

En règle générale, deux moyens de freinage indépendants doivent être présents sur les machines d'extraction, chacun pouvant arrêter le transporteur tout en contrôlant la décélération (Galloway et Tiley, 1986). Ces freins assurent deux fonctions : freinage de service et freinage d'urgence. Ces systèmes de freins sont généralement dimensionnés pour retenir deux fois la charge maximale statique au fond du puits, afin de permettre des évolutions du puits et prendre en compte une perte de performance⁴ (Galloway et Tiley, 1986).

Les premiers systèmes de freinage mécaniques étaient constitués de freins à tambour fonctionnant généralement à l'air comprimé ou avec de l'huile sous pression (ABB, 2011). Aujourd'hui des systèmes de freins hydrauliques à disque sont utilisés pour les nouvelles installations (Leonida, 2013). Il est aussi possible de mettre en place des systèmes de freinage qui contrôlent la décélération en fonction d'un certain nombre de paramètres (ABB, 2011; Sparg, 1995).

La réglementation québécoise exige que les machines d'extraction au Québec soient équipées d'au moins deux moyens de freinage séparés (Figure 6), chacun étant capable de freiner la machine dans les conditions les plus défavorables et de maintenir la machine à l'arrêt. Ces moyens de freinage servent comme freins de service et d'urgence. Ils sont jumelés à des régulateurs de vitesse performants et ils n'ont plus besoin de résister à des variations de chaleur importante durant l'opération normale, comme cela était le cas auparavant. Pour ces raisons, les nouvelles machines sont munies de pinces de freinage montées autour d'un disque plutôt que des traditionnels freins à montants parallèles, qui étaient robustes et conçus pour absorber la chaleur.

Le nombre de pinces de freinage dépend des charges transportées par la machine d'extraction et elles doivent être activées par au moins deux canaux distincts, chacun étant capable d'arrêter la machine d'extraction avec la masse maximale de minerai ou de personnel. Les taux de décélération minimaux que chaque canal doit atteindre sont de $1,5 \text{ m/s}^2$ (5 pi/s^2) avec du personnel et de $0,9 \text{ m/s}^2$ (3 pi/s^2) avec du minerai. La machine la plus récente compte quatre moyens de freinage distincts, donc quatre canaux. Chaque canal est muni de son propre PES, de ses valves de régulation ainsi que de ses orifices d'évacuation de la pression, tous indépendants des autres canaux. La performance des PES permet maintenant une régulation rapide de la décélération durant un arrêt d'urgence.

⁴ Selon l'article 225 du RSSM, il faut vérifier au début de chaque quart de travail que chacun des moyens de freinage est en mesure de retenir la charge maximale.

C.I.VI Consoles d'opération

Environ 20 % des consoles au Québec sont encore d'ancienne génération et utilisent des indicateurs lumineux, des boutons poussoirs, des cadrans, des sélecteurs, des clés et autres dispositifs en pièces discrètes. Sur les nouvelles installations, la console ne comporte que l'interface d'opération et quelques boutons et sélecteurs. Les consoles d'opération des machines d'extraction récentes sont munies d'interfaces homme-machine. Ces interfaces peuvent afficher à peu près tous les paramètres mesurés ou contrôlés par le PES. Le logiciel permet d'enregistrer les données et sert de « boîte noire » lors des pannes. Il y a souvent deux (voire trois) consoles d'opération qui peuvent être utilisées par l'opérateur pour commander la même machine d'extraction. Il y a une console d'opération dite principale située près du tambour et une (ou plusieurs) console (s) à distance, reliée (s) par des réseaux de communication. Cependant, cette configuration n'a pas été prévue par le législateur.

C.I.VII Commande en mode ascenseur et commande à distance

Les améliorations technologiques apportées aux machines d'extraction permettent maintenant une facilité d'opération avec les modes automatique et à distance. Le mode automatique était déjà utilisé par plusieurs compagnies minières, ce qui leur permettait d'avoir un seul opérateur pour deux ou trois machines d'extraction. Par contre, une innovation a été introduite au cours des années 2000 qui a permis de ne pas déléguer de préposé au transporteur lorsque des travailleurs sont sous terre. Jusqu'alors, ce préposé s'occupait de faire respecter la réglementation applicable à toute activité de transport de personnel ou de matériel. Par exemple, le préposé gérait le nombre de personnes pouvant prendre place dans la cage, s'occupait de fermer la porte de palier et celle de la cage et, par la suite, donnait les signaux de départ nécessaires.

Il est important que l'opérateur « machine » soit équivalent à l'opérateur humain, sinon des dispositions doivent être prises en ce sens. On peut faire une certaine comparaison avec un ascenseur d'un immeuble, bien que l'environnement minier ne soit pas un environnement d'édifice public où les portes de la gaine d'ascenseur (puits) et de la cabine (cage) s'ouvrent simultanément et automatiquement lorsque la cabine est à la bonne position. Seul le personnel d'entretien peut avoir accès à la gaine d'ascenseur.

Il est préférable, en mode automatique avec ou sans préposé au transporteur, que l'accès au puits soit muni d'une barrure activée électriquement. Cet accès au transporteur serait déverrouillé seulement lorsque la cage est à la bonne position et que la permission d'y accéder est activée. De plus, pour que la commande de départ puisse être fonctionnelle, un interrupteur doit confirmer que la porte de la cage est bien refermée (RSSM art. 253.1).

C.II Code de signaux visuels et sonores

Un point commun à toutes les machines d'extraction opérées manuellement est le code des signaux. Ce code, obligatoire pour tout mouvement d'une machine d'extraction, a été développé et appliqué pour assurer la sécurité des travailleurs. En mode manuel, soit en présence d'un préposé au transporteur et d'un opérateur de la machine d'extraction, tous les déplacements des transporteurs doivent utiliser ces signaux sonores et visuels de façon claire et ordonnée. Le

code des signaux est réglementé par de nombreux articles du Règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines (RSSM, 2018).

Depuis février 2010, la modification de l'article 269 stipule que : « Le code de signaux prévu à l'annexe II doit être utilisé pour le mouvement d'un transporteur, dans toute mine souterraine utilisant une machine d'extraction, sauf lorsque le mouvement du transporteur est commandé en mode automatique ou semi-automatique. »

Il est donc permis d'effectuer des déplacements sans ces signaux pour le hissage du minerai et pour le transport du personnel. Par contre, tous les entretiens périodiques doivent se faire en mode manuel.

C.III Facteur de sécurité du câble d'acier et normes sud-africaines

Avec l'accroissement de la profondeur des puits, le facteur de sécurité d'un câble d'acier est devenu la principale contrainte pour le hissage du minerai. En effet, le poids du câble devient plus important que la charge utile à hisser au point qu'il faut réduire cette charge de minerai afin de respecter le facteur traditionnel de 5 par rapport à la molette. Pour rester économiquement rentable, une nouvelle technologie a été développée avec succès en Afrique du Sud et cette technologie a été introduite au Québec dans les années 2000 pour superviser une diminution de ce facteur de sécurité.

L'approche utilisée par les Sud-africains consiste à réduire et à superviser en continu les contraintes dynamiques imposées aux câbles d'extraction par les accélérations et les décélérations. De cette façon, il est possible de transporter des charges de minerai plus grandes, tout en gardant une marge de sécurité similaire au facteur conventionnel de 5. Le point le plus important de la norme sud-africaine SABS 0294 (2000) est la supervision du poids suspendu en continu. Les contraintes statiques et dynamiques que les câbles d'extraction en acier subissent doivent toujours être inférieures à 40 % de la force de rupture de celui-ci. L'introduction d'un nouvel élément de contrôle, soit les cellules de charge (*load cells*), permet de superviser le poids suspendu en tout temps. La supervision de la condition de l'état du câble d'acier en continu est aussi un nouvel élément de protection qui est réglementé pour abaisser le facteur de sécurité à moins de 5.

Le Québec a été la première province au Canada à permettre l'utilisation de la technologie sud-africaine dans les mines profondes en 1999-2000. L'Ontario vient récemment de modifier l'article 228 12.1 de sa réglementation pour permettre l'utilisation des codes de pratique sud-africains (Ontario regulation 854, 2017). L'augmentation de minerai transporté, grâce à l'application de cette technologie, est considérable pour la rentabilité d'un projet de mine profonde.

Les versions françaises des codes de pratique SABS 0293 (1996) et SABS 0294 (2000) sont disponibles auprès de la CNESST, tandis que l'adaptation de ces codes, réalisée par CanmetMINES pour le Québec, est disponible auprès de la CNESST et de CanmetMINES (Canmetmines, 2002).

C.IV Inspections annuelles

Les essais de décélération annuels, qui sont effectués par un organisme indépendant du fabricant et de la mine, ont pour but de vérifier la performance de chacun des moyens de freinage, des contrôleurs de vitesse et des dispositifs de sécurité, afin de s'assurer que les transporteurs n'excéderont jamais les limites de décélération, de vitesse et de parcours, et ce, même dans les conditions les plus défavorables.

Les essais se font avec ou sans charge et les données sont recueillies sur papier graphique, à l'aide d'un instrument qui enregistre la vitesse du tambour, le courant du moteur, la pression de desserrement des freins et autres signaux pertinents en fonction du temps. L'analyse de ces graphiques permet de connaître la performance de chacun des moyens de freinage, ainsi que celle des contrôleurs d'excès de vitesse.

Simulant par la suite les conditions les plus défavorables, les informations recueillies lors de l'analyse des graphiques permettent de calculer les décélérations et les vitesses maximales qui pourraient être atteintes, ainsi que les distances requises pour l'arrêt. Les résultats obtenus permettent d'établir un diagnostic de l'état des diverses composantes de la machine d'extraction et d'émettre des commentaires et des recommandations.

L'état de l'installation d'extraction et les divers dispositifs de sécurité sont aussi vérifiés par l'organisme indépendant. À la suite de l'inspection, un rapport doit être remis aux dirigeants de la mine.

ANNEXE D : NORMES ET RÉGLEMENTS RELATIFS À LA GESTION DU RISQUE ET AUX SRECS

Cette annexe est essentiellement un résumé, mis à jour, du rapport d'expertise rédigé par Giraud et Galy (2015).

D.I Contexte réglementaire et normatif au Québec, au Canada et aux États-Unis concernant les machines d'extraction

Au Québec, la Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST, 2018) chapeaute deux règlements qui détaillent les exigences pour les machines d'extraction : le RSSM et le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST, 2018). Depuis 2009, le Québec est la seule province qui réfère à un document relativement complet qui porte sur les machines d'extraction commandées par un PES, soit la référence à la fiche technique RF-412.

Au Canada, les réglementations minières sont relativement peu différentes d'une province à l'autre. Certaines d'entre elles semblent un peu plus exhaustives que d'autres en ce qui a trait à l'encadrement du fonctionnement des machines d'extraction commandées par des PES (Galy et Giraud, 2016b). Cependant, aucune de ces réglementations ne propose une méthodologie globale de réduction du risque.

Du point de vue normatif, seule la norme CAN/CSA-M421 (2011) traite du cas des systèmes de commande électroniques pour les machines d'extraction, mais elle aussi ne propose pas de méthodologie globale de réduction du risque.

Aux États-Unis, la réglementation fédérale n'encadre pas spécifiquement la sécurité des machines d'extraction commandées par des PES. Initialement, le Mine Safety and Health Administration (MSHA) a essayé de fixer des recommandations applicables après installation afin de réduire la fréquence des incidents. Cependant, il a été rapidement conclu que cette approche était insuffisante pour les systèmes programmables complexes. Le NIOSH a alors publié une série de circulaires et de guides afin d'aider les concepteurs de machines d'extraction à appliquer les recommandations de la norme CEI 61508.

D.I.I Norme CSA M421

Le Québec et la Colombie-Britannique citent explicitement la norme CSA M421 « Utilisation de l'électricité dans les mines » dans les articles de leur réglementation visant directement les machines d'extraction. Cinq autres provinces citent la norme CSA M421 et stipulent que « tous les équipements électriques » doivent correspondre ou dépasser les exigences de cette norme (Tableau 1). De fait, dans ces provinces, la norme CSA M421 doit être utilisée pour la conception du circuit de sécurité de la machine d'extraction.

Tableau 1. Règlements provinciaux citant la norme CSA M421

Province	Article relatif à la machine d'extraction	Autre article	Année
Québec	476 (sous réserve des art. 232 – 235 circuit de sécurité)	476	1985
Ontario	–	–	–
Saskatchewan	–	–	–
Yukon	–	–	–
Territoires du Nord-Ouest	13.01 – 14.04 <i>electrical equipment</i>	–	1993
Colombie-Britannique	7.6.8 – 7.6.11 – 7.7.1	5.1.1 – 8.1.3	2000
Nouveau-Brunswick	21 <i>all electrical equipment</i>	–	1993
Nouvelle-Écosse	194 <i>an electrical installation</i>	52 – 491	2000
Manitoba	11.3(1)*	6.28 – 12.15	Dernière version
Nunavut	13.01 – 14.04 <i>electrical equipment</i>	–	1993
Terre-Neuve-et-Labrador	617 – 678 <i>electrical equipment</i>	685	Dernière version

* Il n'y a pas de définition précise d'une « installation électrique » au Manitoba.

La norme CSA M421 a fait l'objet de cinq versions depuis sa création en 1985 : 1985, 1993, 2000, 2011 et 2016 (CAN/CSA-M421, 1985, 1993, 2000, 2011, 2016). Les versions de 1985 et de 1993 sont semblables, ainsi que celles de 2000 et 2011. Pour les machines, d'extraction, les changements majeurs sont apparus en 2000 avec notamment l'ajout d'une clause mentionnant que l'interrupteur d'arrêt d'urgence doit être indépendant des décisions logiques de l'ordinateur (5.8.3.6 dans la version 2000, 6.9.3.4 dans la version 2011), l'ajout d'un indicateur de profondeur et d'un indicateur de haut niveau d'eau obligatoire, et l'ajout de l'annexe C informative portant sur les machines d'extraction et plus précisément sur leurs systèmes électroniques de commande. En 2016, l'article 6.9.3.4 est devenu 6.10.3.4, et l'alinéa d) a légèrement été modifié : l'interrupteur manuel doit maintenant « offrir une fiabilité des contrôles, selon la définition énoncée à l'article 8.2.5 de la CSA Z432 ». La norme CSA M421 de 2016 renvoie à la version 2004 de la CSA Z432 (2004). Il faut cependant noter que la dernière version de la norme CSA Z432 (2016) a complètement abandonné la notion de « système de commande fiable » présentée dans la version de 2004, pour se référer aux niveaux d'intégrité de sécurité (SIL) de la norme CEI 62061 (2005) et aux niveaux de performance (PL) de la norme ISO 13849-1 (2015). Ainsi, les auteurs recommandent d'utiliser l'approche de la norme

CSA M421 de 2011, ou de faire la démonstration que le SIL ou le PL requis est atteint dans le cas d'un interrupteur d'arrêt d'urgence lié à la logique de sécurité.

D.I.II *Recommandations du NIOSH*

Le NIOSH a publié un recueil de circulaires (Mowrey, Fisher, Sammarco, et Fries, 2002; Sammarco, 2005, 2006; Sammarco et Fisher, 2001; Sammarco, Fisher, et Jobes, 2001; Sammarco, Fisher, Welsh, et Pazuchanics, 2001; Sammarco et Flynt, 2006; Sammarco et Fries, 2003) basées sur la norme CEI 61508 (2010), détaillant les meilleures pratiques pour les systèmes programmables en huit parties (initialement neuf parties étaient prévues, mais le numéro 7 n'a finalement jamais été publié) (Figure 8).

La partie 1 est une introduction générale et rappelle que la première cause des accidents et incidents pour les machines à commande programmable est due à un problème lors de la phase de spécification (44 %), et que la deuxième cause est la modification (21 %). Cette partie insiste sur la nécessité d'adopter une méthode de cycle de vie pour les machines d'extraction, comme recommandé par la norme CEI 61508 (2010).

La partie 2, intitulée *system safety*, est principalement basée sur la norme CEI 61508 (2010) et fait référence à quelques normes additionnelles. Cette partie 2 inclut notamment des recommandations sur l'interverrouillage (6.6.3.13) et la réutilisation de matériel ou de code (6.6.3.14). Cette partie rappelle également que l'interface utilisée par l'opérateur doit être considérée comme une fonction de sécurité (6.6.4.13) et devrait répondre à plusieurs critères (par exemple, annuler l'opération en cours en une seule étape et mener à un état sécuritaire). Il doit y avoir des interfaces de maintenance et de diagnostic, et celles-ci ne doivent pas permettre une modification du code. Ce document formule également des recommandations sur le contenu de formation pour les utilisateurs des machines à commande programmable, et indique que le niveau de formation devrait être d'autant plus élevé que le SIL est élevé (6.9.5).

La partie 3 porte sur la sécurité logicielle et est, elle aussi, grandement basée sur la norme CEI 61508. La partie 4 porte sur la *safety file*, soit le document regroupant les informations relatives à la sécurité du système E/E/PE. Essentiellement, ce document constitue une « preuve de sécurité » de la machine d'extraction, il sert à montrer que le niveau de sécurité atteint est en adéquation avec l'utilisation de la machine. Cette partie pourrait être utilisée afin de définir un document générique qui pourrait servir pour les futures machines d'extraction.

La partie 5 porte sur l'évaluation indépendante de la sécurité fonctionnelle. Le niveau d'indépendance de la personne s'assurant de la sécurité fonctionnelle est d'autant plus élevé que le SIL visé est élevé.

Les parties 6, 8 et 9 sont des guides à utiliser en conjonction avec les parties 2, 4 et 5 respectivement. La partie 7, qui n'a jamais été publiée, était destinée à être un guide pour la partie 3 sur la sécurité logicielle.

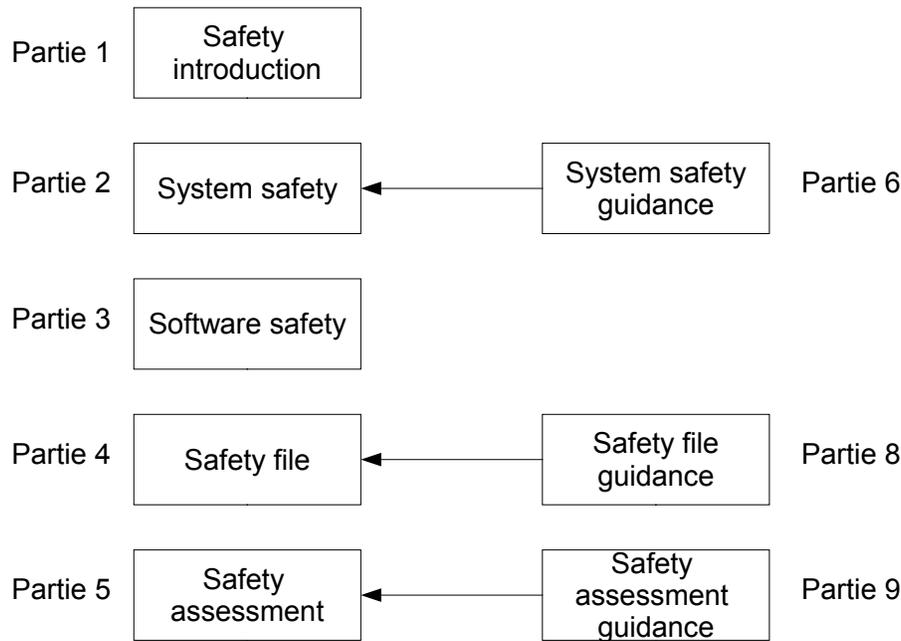


Figure 8. Guides publiés par le NIOSH.

D.II Les normes relatives aux systèmes de commande

Deux univers de normes internationales peuvent être utilisés pour concevoir correctement les SRECS d'une machine d'extraction.

D'un côté se trouve la norme **ISO 13849-1** (2015), intitulée « Sécurité des machines – Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité – Partie 1 : Principes généraux de conception » et encadrée par la norme de base en sécurité des machines soit la norme de type A ISO 12100 (2010). De l'autre côté se trouve la norme mère **CEI 61508** (2010) et les différentes normes filles dont deux sont pertinentes dans le cas présent, la CEI 61511 (2016) pour le secteur des procédés industriels et la CEI 62061 pour les machines, cette dernière étant intitulée « Sécurité des machines - Sécurité fonctionnelle des systèmes de commande électriques, électroniques et électroniques programmables relatifs à la sécurité » (2005).

La norme ISO 13849-1 s'applique à tous les systèmes de commande de toutes les machines, alors que la CEI 62061 s'applique uniquement aux systèmes de commande de machines utilisant des systèmes électriques, électroniques ou électroniques programmables (Figure 9).

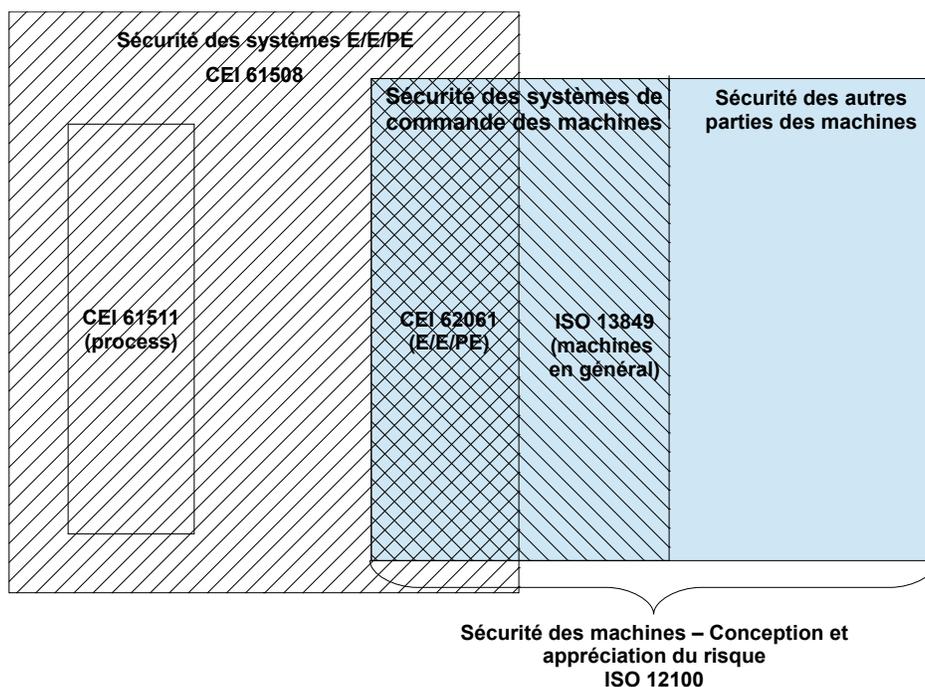


Figure 9. Domaine d'application des normes CEI et ISO.

D.II.I ISO 13849 (systèmes de commande des machines)

Dans la norme ISO 13849, la capacité d'une partie d'un système de commande relative à la sécurité (SRP/CS) à effectuer la fonction de sécurité est évaluée à travers le niveau de performance PL (5 niveaux allant de PLa à PLe), ce qui est à peu près équivalent au niveau d'intégrité de sécurité (SIL) dans la famille de normes CEI 61508. Le niveau de performance est déterminé *a priori*, lors de l'estimation de risque, ce qui permet de déterminer l'importance de la fonction de sécurité dans la réduction globale du risque (Baudoin et Bello, 2013a).

Dans le cas où plusieurs SRP/CS sont utilisés en série, il faut définir le PL de chaque SRP/CS et ensuite le PL global. Le PL de la fonction de sécurité globale sera réduit, soit au niveau de performance le plus faible de la série, soit à un niveau inférieur si tous les PL sont égaux. La norme fournit un tableau qui permet d'estimer la baisse du PL selon la configuration.

Différentes architectures de fonction de sécurité (catégories B, 1, 2, 3 et 4) sont proposées dans la norme et les exigences relatives à chaque catégorie sont détaillées.

D.II.II CEI 61508, 61511 et 62061

La CEI 61508 est une norme orientée vers les « performances ». Cela signifie que, par opposition aux normes dites déterministes et prescriptives, c'est l'utilisateur qui, à travers son analyse et son évaluation du risque, détermine les performances à atteindre par son système électrique/électronique/électronique programmable (E/E/PE) concerné par la sécurité (ISA, 2005). La norme CEI 61508 est la norme « mère » et plusieurs normes sectorielles sont dérivées de cette norme mère (Figure 10) (par exemple, EN 50126 pour le ferroviaire, CEI 61513 pour le nucléaire). La CEI 61511 apporte surtout dans ses parties non normatives des réponses à des questions fréquentes (ISA, 2005).

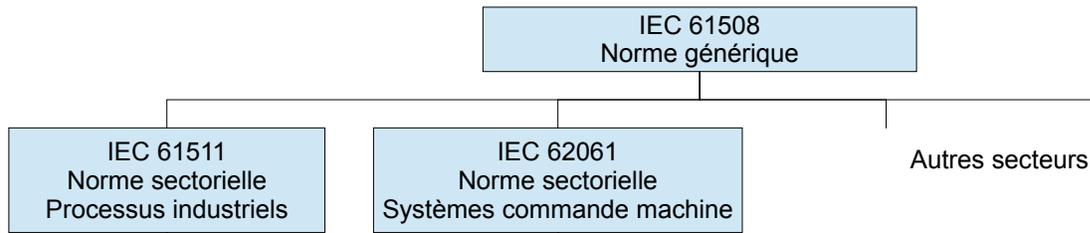


Figure 10. Structure normative.
(Adaptée de ISA, 2005)

Le statut de la norme CEI 61508 lui permet d'être utilisée pour (ISA, 2005) :

- disposer d'exigences génériques pour des systèmes E/E/PE concernés par la sécurité lorsqu'il n'existe aucune norme sectorielle ou produit, ou lorsque ces exigences ne sont pas appropriées;
- les constructeurs de composants ou de sous-systèmes E/E/PE dans tous les secteurs (par exemple, matériel et logiciel pour capteurs, actionneurs intelligents, contrôleurs programmables);
- les constructeurs/intégrateurs de systèmes pour atteindre les exigences des systèmes E/E/PE concernés par la sécurité;
- les utilisateurs pour spécifier les exigences relatives aux fonctions de sécurité à réaliser ainsi que des performances de ces fonctions de sécurité;
- faciliter la maintenance des systèmes E/E/PE concernés par la sécurité au niveau d'intégrité de la sécurité « tel que construit »;
- fournir un cadre technique pour des services d'évaluation et de certification;
- disposer d'une base pour réaliser des évaluations des activités du cycle de vie de la sécurité.

Une des difficultés associées à la norme est le fait que quelqu'un doit s'engager sur le risque tolérable. La norme CEI 61508 donne des balises sur le niveau minimum d'indépendance par rapport aux conséquences (dommages) possibles (Tableau 2). Plus les conséquences sont graves, plus les exigences sur l'indépendance des décideurs doivent être grandes. Par exemple, pour des décès multiples ou une catastrophe (l'écrasement d'une cage transportant plus de 20 mineurs peut être considéré comme une catastrophe au même titre qu'une explosion dans une raffinerie), la norme recommande qu'une organisation indépendante soit responsable de l'évaluation de la sécurité fonctionnelle (autre que la mine ou que le fabricant de la machine d'extraction). Ainsi, pour une machine d'extraction, selon la taille de la cage, la colonne « conséquences » pourrait être C ou D.

Tableau 2. Indépendance des personnes responsables de l'évaluation de la sécurité fonctionnelle des systèmes E/E/PE concernés par la sécurité
(Adapté de CEI 61508-1, 2010)

Degré minimal d'indépendance	Conséquences			
	A	B	C	D
Personne indépendante	X	X1	Y	Y
Département indépendant		X2	X1	Y
Organisme indépendant			X2	X
Notes : voir les paragraphes 8.2.15 à 8.2.17 de la norme pour les détails A – blessure mineure temporaire, B – blessure permanente à une ou plusieurs personnes, décès, C – décès multiples, D – très grand nombre de décès X – niveau minimal, Y – insuffisant, X1 ou X2 – l'un ou l'autre, détailler et expliquer le choix (voir 8.2.16)				

Les normes CEI 61508, 61511 et 62061 permettent de calculer les SIL des systèmes instrumentés de sécurité (SIS) (CEI 61508, 2010; CEI 61511, 2016; CEI 62061, 2005). Il faut faire attention et ne pas confondre les méthodes pour calculer le SIL : la norme CEI 61508 s'adresse plutôt aux constructeurs de matériel, la norme CEI 61511 aux concepteurs et intégrateurs de processus industriels et la norme CEI 62061 s'adresse aux concepteurs ou intégrateurs des systèmes de commande E/E/PE relatifs à la sécurité des machines. De ce fait, pour une machine d'extraction utilisée dans une mine, c'est donc les normes CEI 61508 ou CEI 62061 qui s'appliquent. Cependant, la norme CEI 62061 ne considère pas le SIL 4 qui existe dans la norme CEI 61508.

D.II.III Unification des deux normes

Entre 2012 et 2015, l'ISO et la CEI ont formé un groupe de travail au sein du comité ISO TC199 qui avait pour mission de fusionner les deux normes ISO 13849 et CEI 62061 pour n'en donner qu'une seule, numérotée temporairement ISO/CEI 17305 (ISO/TR 23849, 2010). Cette fusion a posé certaines difficultés, car les niveaux d'intégrité de sécurité, notés SIL dans la norme CEI 61508, et les niveaux de performance, notés PL dans la norme ISO 13849, ne sont pas strictement équivalents. Il y a même des cas où ces niveaux se contredisent (Buchweiler, 2009) :

- À peu près la moitié des cas : même SIL;
- À peu près l'autre moitié : écart d'un niveau d'intégrité de sécurité;
- Quelques cas : écart de deux niveaux d'intégrité de sécurité.

Cette divergence probable pouvait générer des conséquences dommageables pour la sécurité en diminuant le niveau de sécurité. En 2015, l'ISO TC199 a donc décidé d'abandonner la fusion en cours.

D.III Niveaux de contribution à la réduction du risque (SIL ou PL)

Pour identifier les SIS et définir leurs niveaux de contribution à la réduction du risque, il est nécessaire que les risques et leurs conséquences soient identifiés. Les données suivantes sont nécessaires (Adjadj et Charpentier, 2007; Lanternier et Adjadj, 2008) :

- Description des procédés et des installations;

- Historique des incidents et accidents répertoriés;
- Identification et caractérisation des potentiels de dangers et estimation de leurs effets;
- Analyses de risque réalisées.

La norme CEI 62061 conseille une méthodologie pour l'attribution des niveaux d'intégrité de sécurité (SIL) dans une annexe informative de la norme. Pour sa part, l'ISO 13849 indique qu'un niveau de performance requis (PLr) doit être déterminé et documenté, et réfère pour cela à des lignes directrices comprises dans une annexe, elle aussi informative.

D.III.I Selon la norme ISO 13849-1

La norme ISO 13849-1 utilise cinq niveaux de performance (PL) qui sont définis selon la probabilité de défaillance dangereuse par heure de la fonction de sécurité. Les cinq niveaux, numérotés de « a » à « e », sont basés sur une gamme de probabilités de défaillance dangereuse par heure (Tableau 3).

Tableau 3. Niveaux de performance (PL) de la norme ISO 13849-1

PL	Probabilité moyenne d'une défaillance dangereuse par heure (1/h)
a	$\geq 10^{-5}$ à $< 10^{-4}$
b	$\geq 3 \times 10^{-6}$ à $< 10^{-5}$
c	$\geq 10^{-6}$ à $< 3 \times 10^{-6}$
d	$\geq 10^{-7}$ à $< 10^{-6}$
e	$\geq 10^{-8}$ à $< 10^{-7}$

Cependant, la norme ISO 13849-1 indique qu'il ne faut pas uniquement considérer la probabilité moyenne de défaillance dangereuse par heure pour obtenir le niveau de performance « associé » : il faut aussi considérer, par exemple, les défauts systématiques, les défaillances de causes communes, la couverture de diagnostic.

Comme pour la norme CEI 62061, le niveau de performance requis (PLr) est fonction de l'importance du SIS à la réduction du risque pour une fonction de sécurité donnée. La norme indique que le PLa est principalement utilisé dans le cas d'un dommage faible et réversible.

D.III.II Selon les normes CEI 61511 et CEI 62061

La norme CEI 61511 définit deux méthodes qualitatives pour déterminer le SIL : le graphe de risque et la grille de criticité (matrice probabilité/gravité). Il est aussi possible d'utiliser une méthode semi-quantitative pour déterminer la probabilité de défaillance du SIS.

La conception des SIS est fonction du SIL requis (Iddir, 2012a) et du mode de sollicitation du SIS (Tableau 4) : à faible sollicitation/à la demande (alarme de dépassement de niveau), ou à forte sollicitation/continu. Dans le premier cas, la demande doit être de l'ordre de 1 par année ou inférieure à la fréquence des tests périodiques afin de détecter une défaillance avant la survenue d'un événement dangereux. Dans le deuxième cas, le SIS est considéré répondre au critère de forte sollicitation lorsque la fréquence des demandes de fonctionnement est plus

grande qu'une par an, ou supérieure à la fréquence des tests périodiques. Prenons un SIL3 à faible sollicitation avec une probabilité de défaillance égale à 5×10^{-4} , ce même SIL3, lorsque considéré avec un mode de fonctionnement à forte sollicitation, devra avoir une probabilité de défaillance de 5×10^{-8} (soit 10 000 fois plus faible), car on considère une sollicitation à l'heure en mode de fonctionnement à forte sollicitation et une sollicitation par an en mode à faible sollicitation.

Tableau 4. Définition des SIL selon le mode de sollicitation

Niveau d'intégrité de sécurité (SIL)	Probabilité de défaillance dangereuse par an	Facteur de réduction du risque
mode de fonctionnement à faible sollicitation		
1	10^{-1} à 10^{-2}	10 à 100
2	10^{-2} à 10^{-3}	100 à 1 000
3	10^{-3} à 10^{-4}	1 000 à 10 000
4	10^{-4} à 10^{-5}	10 000 à 100 000
mode de fonctionnement à forte sollicitation		
1	10^{-5} à 10^{-6}	10 à 100
2	10^{-6} à 10^{-7}	100 à 1 000
3	10^{-7} à 10^{-8}	1 000 à 10 000
4	10^{-8} à 10^{-9}	10 000 à 100 000

Dans le cas des machines d'extraction, un SIS qui est à faible sollicitation est, par exemple, l'évite-molette ou le système de freinage associé, alors qu'un SIS qui supervise la vitesse en fonction de la position du transporteur est à forte sollicitation.

Pour les machines, la norme CEI 62061 conseille une méthodologie pour l'attribution des niveaux d'intégrité de sécurité (SIL). Cette méthode utilise quatre paramètres :

- la sévérité du dommage possible – Se;
- la probabilité d'apparition du dommage – $CI = Fr + Pr + Av$, qui se décompose en trois autres paramètres :
 - la fréquence et la durée de l'exposition – Fr;
 - la probabilité d'apparition d'un événement dangereux – Pr;
 - la probabilité d'évitement ou de limitation du dommage – Av.

Une fois Se et CI définis, une matrice permet d'identifier le SIL requis pour chaque fonction de sécurité (Baudoin et Bello, 2013b; Buchweiler, 2008). Il faut noter que la norme CEI 62061 utilise les mêmes niveaux d'intégrité de sécurité que la CEI 61511, mais le niveau 4 n'existe pas dans la norme CEI 62061, comme si une machine ne pouvait pas créer de catastrophe équivalente à un procédé industriel. Or, une machine d'extraction qui transporte 50 travailleurs et qui devient « folle » avec un arrêt d'urgence non fonctionnel peut créer une catastrophe équivalente à celle causée par un procédé industriel.

D.III.III Équivalence SIL et PL

Il est possible de comparer les niveaux d'intégrité de sécurité et de performance des deux référentiels précédents (Tableau 5) (ISO/TR 23849, 2010). Cependant, cette équivalence n'est pas parfaite, car pour une fonction de sécurité fortement sollicitée (en mode continu), l'équivalence entre les probabilités de défaillance dangereuse par année et par heure est basée sur 10 000 heures de fonctionnement par an. Or, une année calendaire correspond à environ 8 766 heures en moyenne⁵, ce qui entraîne une différence de l'ordre de 14 %.

Selon la norme ISO 13849-1 (4.5.1), il n'y a pas d'équivalence entre le SIL 4 et un niveau PL. La justification donnée est que le SIL 4 est réservé aux « événements catastrophiques » possibles dans l'industrie de la transformation et que cette échelle n'est donc pas pertinente pour traiter des risques machines. Or, comme mentionné précédemment dans la sous-section D.III.I, l'écrasement d'une cage avec le maximum de personnes autorisé à l'intérieur risque d'être perçu dans la société comme un « événement catastrophique ».

Tableau 5. Équivalence SIL et PFHD

Niveau d'intégrité de sécurité (SIL) CEI 61508	Probabilité de défaillance dangereuse par an	Probabilité de défaillance dangereuse par heure (PFHD)	Niveau de performance (PL) ISO 13849
-	-	10^{-5} à 10^{-4}	a
1	10^{-1} à 10^{-2}	3×10^{-6} à 10^{-5}	b
1	10^{-1} à 10^{-2}	10^{-6} à 3×10^{-6}	c
2	10^{-2} à 10^{-3}	10^{-7} à 10^{-6}	d
3	10^{-3} à 10^{-4}	10^{-8} à 10^{-7}	e
4	10^{-4} à 10^{-5}	10^{-9} à 10^{-8}	-

⁵ L'année tropique a une durée estimée de 365 jours 5 heures 48 minutes 45,25 secondes.

ANNEXE E : ANALYSE DU RISQUE

E.1 Introduction

Suivant la définition que la norme ISO 12100 (2010) propose⁶, une machine d'extraction utilisée dans le secteur minier peut être considérée comme faisant partie du domaine d'application et ainsi faire l'objet de la démarche de réduction du risque préconisée par la norme. Cette démarche consiste notamment à réaliser une analyse permettant, à terme, d'identifier les mesures de prévention les plus appropriées aux différents contextes d'intervention avec les travailleurs. L'analyse du risque qui a été menée dans le contexte de ce projet avait comme objectif d'identifier les risques et les situations dangereuses liés à l'utilisation des systèmes de commande programmables (PES) pour les machines d'extraction, mais surtout de s'assurer que les fonctions de sécurité réalisées par ces mêmes PES couvraient l'ensemble des situations dangereuses raisonnablement prévisibles.

Depuis la parution en 2005 de la fiche technique RF-412, plusieurs normes en sécurité des machines ont évolué. Deux normes importantes portant sur la robustesse des circuits de commande relatifs à la sécurité sont maintenant devenues des documents de référence utilisés dans le domaine industriel et leur usage se répand. La norme CEI 62061 (2005) et la norme ISO 13849-1 (2015), portant sur la « fiabilité » des systèmes de commande relatifs à la sécurité, recommandent de réaliser une appréciation du risque⁷ et proposent, chacune à leur façon, une méthode d'estimation du risque permettant de déterminer un niveau de fiabilité adapté aux situations décrites dans une analyse du risque.

C'est dans cet esprit que l'application des prescriptions normatives relativement à la nécessité de réaliser une analyse du risque prend sa source dans la mise à jour de la fiche technique associée à ce rapport annexe. Ce travail devait permettre d'identifier les fonctions de sécurité sur lesquelles les PES des machines d'extraction peuvent avoir une influence sur la sécurité des personnes.

Comme mentionné dans la fiche technique RF-412 de 2005, l'analyse du risque initiale « était basée sur une analyse informelle des risques, élaborée avec l'expérience aussi bien des utilisateurs que des fabricants et des inspecteurs de la CSST ». Or, compte tenu de l'évolution des technologies, il apparaissait souhaitable de baser la mise à jour de la fiche technique RF-412 sur une analyse du risque plus formelle afin de mieux cerner les problématiques liées aux nouvelles technologies utilisées et d'estimer les niveaux de fiabilité requis des mesures de protection utilisées pour garantir la sécurité des machines d'extraction au Québec.

L'objectif principal de procéder à une analyse du risque était donc d'identifier les fonctions de sécurité pour les situations dangereuses générées par la machine d'extraction sur lesquelles le PES peut avoir une influence.

⁶ Article 3.1 de la norme ISO 12100:2010

⁷ Selon la définition à l'article 3.17 de la norme ISO 12100:2010, une appréciation du risque consiste en une analyse du risque et en une évaluation du risque

E.II Méthodologie

L'objectif ultime de la fiche technique RF-412 étant de s'assurer de la sécurité des travailleurs ayant à intervenir sur des machines d'extraction commandées par des systèmes programmables (PES), la méthodologie utilisée dans le contexte de sa révision s'inspire des prescriptions normatives présentées dans les normes CEI 62061 et ISO 13849, qui recommandent toutes deux de procéder à une analyse du risque conformément aux principes décrits à la norme ISO 12100⁸.

Considérant que les machines d'extraction en utilisation au Québec ne sont pas identiques, et compte tenu de l'ampleur du travail que cela aurait nécessité, il a été convenu de procéder à une analyse du risque « générique » permettant de cibler les situations dangereuses issues d'une machine d'extraction typique et les fonctions de sécurité que devraient remplir les PES des machines d'extraction. Comme cela a été le cas pendant la rédaction de la fiche RF-412, la démarche d'analyse est basée en partie sur l'expérience des intervenants, mais également sur les informations obtenues lors de visites ayant été réalisées dans divers sites, sur les résultats de rapports d'accidents survenus récemment ainsi que sur l'interprétation d'autres normes pertinentes telles que la norme ISO 22559-1 (2014)⁹ portant sur les exigences de sécurité des ascenseurs.

Suivant les prescriptions de la norme ISO 13849 (art. 4.2.2), c'est à partir des informations recueillies lors de l'analyse du risque que le concepteur doit décider de la contribution à la réduction du risque que doit fournir chaque partie des systèmes de commande relative à la sécurité (SRP/CS). Cette contribution ne couvre pas le risque global de la machine, mais seulement la partie du risque qui est réduite par l'application de fonctions de sécurité particulières. De la même manière, la norme CEI 62061 (art. 5.2.1.1 et 5.2.2) ne propose pas de prescriptions détaillées relativement à la démarche d'analyse du risque, mais préconise d'utiliser les résultats de cette appréciation afin d'identifier toutes les fonctions de sécurité considérées comme étant nécessaires.

La démarche suivie a donc consisté, premièrement, à établir une liste des fonctions de sécurité des machines d'extraction à partir de toutes les sources d'informations jugées pertinentes. Une fois ces informations colligées, une séance d'analyse du risque à laquelle ont participé plusieurs experts du milieu a été réalisée. C'est lors de cette séance que les résultats ont été confirmés ou infirmés.

Cet exercice a permis d'élaborer une liste des fonctions de sécurité dans lesquelles des sous-fonctions ont également été identifiées. Ces fonctions et ces sous-fonctions devraient couvrir toutes les situations dangereuses raisonnablement prévisibles pouvant se présenter dans le contexte de l'utilisation d'une machine d'extraction typique.

⁸ La norme CEI 62061 cite la norme ISO 14121 (2007) comme modèle de l'appréciation du risque, mais cette norme a été retirée et remplacée par la norme ISO 12100 en 2010.

⁹ La norme ISO 22559-1 a été remplacée par la norme ISO 8100-20 en août 2018.

E.III Analyse du risque formelle

E.III.1 Sources d'information et liste des fonctions de sécurité initiales

Plusieurs documents et sources d'information ont servi à établir la liste préliminaire des fonctions et des sous-fonctions de sécurité que devraient remplir ou qui devraient être supervisées par les PES des machines d'extraction :

- Comme mentionné plus haut, la fiche RF-412 dans sa version 2005 a été utilisée comme source importante des fonctions de sécurité. L'application des notions qui y étaient présentées a été rendue obligatoire depuis 2009 dans le Règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines (RSSM). C'est ainsi que son contenu a fait l'objet d'une validation indirecte, mais continue depuis ce temps.
- Le RSSM a lui-même été une source importante des fonctions de sécurité que devraient remplir les machines d'extraction, qu'elles soient commandées par des PES ou non. Le RSSM n'énumérant que les dispositifs devant être présents sur les machines d'extraction et non pas les fonctions de sécurité elles-mêmes, une adéquation entre les dispositifs et les fonctions a dû être effectuée au préalable.
- L'analyse d'enquêtes d'accidents s'étant produits dans les dernières années et mettant en cause des machines d'extraction a également servi à bonifier le contenu de la liste des fonctions. Les fonctions de sécurité qui auraient pu contribuer à éviter ces accidents ont été identifiées.
- Les normes SABS 0294 (2000) et CSA M421:2011 (2011) ont aussi été utilisées afin de répertorier certaines protections que devraient comporter les machines d'extraction.
- Considérant qu'aucun autre document normatif de ce genre ne semblait exister sur les machines d'extraction et considérant les ressemblances avec les ascenseurs lorsqu'elles sont utilisées pour le transport des personnes, la norme ISO 22559-1 apparaissait comme étant incontournable et a donc servi comme première référence dans l'établissement de la liste des fonctions présentées lors de la séance d'analyse du risque. Cette liste semblait comporter toutes les fonctions de sécurité nécessaires pour encadrer l'ensemble des situations dangereuses génériques présentes sur les machines d'extraction.
- La norme EN 81-20:2014 (2014) sur la construction et l'installation des ascenseurs et des ascenseurs de charge a servi de référence. Ce document présente notamment une liste de cinquante dispositifs électriques de sécurité permettant la réalisation des fonctions de sécurité ainsi que le SIL correspondant.
- Le « Registre des appareils servant à l'extraction », élaboré par CanmetMINES et utilisé dans le cadre des inspections des machines d'extraction au Québec, a finalement servi comme document de référence dans l'établissement de la liste des fonctions et des sous-fonctions de sécurité.

Ainsi, en confirmant à partir de ces sources d'information les exigences essentielles de sécurité en relation avec les personnes dans l'unité de transport de la norme ISO 22559-1, la liste préliminaire des fonctions de sécurité qui a été utilisée lors de la séance d'analyse du risque a été élaborée. Cette liste initiale se voulait être une base de réflexion sur la sécurité des machines d'extraction en général et les fonctions de sécurité qu'elle comportait avaient pour objet de :

1. Empêcher le déplacement du transporteur s'il est en surcharge;
2. Prévenir des chutes en dehors du transporteur;
3. Limiter la course verticale du transporteur;
4. Protéger le moteur et le réseau électrique;
5. Protéger les moyens de freinage;
6. Protéger le fonctionnement;
7. Protéger le réarmement ou le verrouillage du circuit de sécurité;
8. Éviter une collision du transporteur avec tout obstacle dans le puits;
9. Empêcher tous déplacements du transporteur dans une zone inondée du puits;
10. Prévenir la rupture du câble;
11. Protéger le fonçage d'un puits.

E.III.II Liste des phénomènes dangereux et des mesures de prévention

Les phénomènes dangereux en cause avec cette machine sont essentiellement ceux liés à la gravité terrestre (chute de la cage dans le puits), à l'énergie cinétique associée aux mouvements de la cage dans le puits (écrasement de la cage contre un obstacle dans le puits), ainsi qu'à la noyade au fond du puits.

Les phénomènes dangereux suivants n'ont pas été pris en compte dans cette analyse du risque : bruit, vibrations, température, feu, explosion, catastrophe naturelle (tremblement de terre, par exemple), asphyxie autre que par noyade, rayonnements divers (magnétiques, électriques ou autres).

Les mesures de réduction du risque, hors système de commande, sont limitées pour cette machine spécifique. Il n'est pas possible d'éliminer la gravité terrestre qui s'applique en tout temps sur terre et sous terre. En revanche, pour l'énergie cinétique, la mesure de prévention principale est le profil de vitesse et son respect. Enfin, pour contrer la noyade au fond du puits, des moyens de pompage de l'eau sont présents dans chaque puits.

E.III.III Séance d'analyse du risque avec les experts

Suivant la méthodologie préconisée dans la norme ISO 12100 et aussi selon celle proposée dans la norme ISO 14798:2009 (2009) portant sur la méthodologie de l'appréciation du risque et de la réduction du risque pour les ascenseurs, escaliers mécaniques et trottoirs roulants, une équipe d'experts a été constituée afin de parcourir les différentes fonctions de sécurité préalablement identifiées (Tableau 6). La séance d'analyse du risque devait donc permettre de confirmer que la liste préliminaire des fonctions de sécurité était la plus exhaustive possible et qu'elle incluait toutes les situations dangereuses raisonnablement prévisibles par les participants.

Toujours selon les recommandations normatives, les participants de la séance ont été choisis de manière à présenter le plus large éventail de connaissances et d'intérêts possible sur le sujet des machines d'extraction. Les huit participants provenaient de milieux différents et apportaient leur expertise respective au regard des connaissances qu'ils avaient de ces systèmes.

Tableau 6. Participants à l'analyse du risque

Nom	Compagnie ou groupe représenté	Fonction des participants
Réal Bourbonnière	Consultant	Consultant en sécurité des machines agissant à titre de modérateur de la séance
Bertrand Galy	IRSST	Chercheur
Laurent Giraud	IRSST	Chercheur
Louis Germain	CanmetMINES Ressources naturelles Canada	Technicien sénior en machines d'extraction
Mario St-Pierre	CNESST	Inspecteur et conseiller expert de la CNESST, secteur mines
Christian Quirion	Association patronale	Surintendant maintenance des machines d'extraction
Marc Robitaille	Syndicat	Électronicien, secteur minier
Alain Gilbert	Fabricant	Superviseur de l'ingénierie, système de treuils - fabricant de systèmes de commande pour machines d'extraction
Michel Girard	Firme de génie-conseil	Consultant, directeur de projet - Électricité et automatisation pour firme d'ingénierie minière

Faisant suite à une présentation sous forme de rappel des notions normatives relatives à la fiabilité des systèmes de commande, l'objectif de cette séance d'une durée de deux journées consistait premièrement à déterminer si la liste des fonctions de sécurité semblait complète aux yeux des participants de manière à couvrir toutes les situations dangereuses raisonnablement prévisibles. Les fonctions de sécurité ont été présentées et ont fait l'objet de discussions sur les scénarios pouvant se produire.

Dans un deuxième temps, les participants étaient invités à déterminer ensemble un niveau « d'intégrité » selon les recommandations de la norme CEI 62061 pour chacune de ces fonctions. C'est la démarche de la norme CEI 62061 qui a été retenue plutôt que celle proposée dans la norme ISO 13849. Ce choix repose en partie sur le fait que les systèmes dont il est question dans le cas des machines d'extraction sont considérés comme étant complexes et font toujours appel à des systèmes électroniques programmables (PES) dont il est question dans la fiche RF-412. Aussi, la norme EN 81-20 fait référence aux SIL de la norme CEI 62061. Finalement, la norme CEI 62061 semble déjà être appliquée par certains fabricants œuvrant dans le domaine de la conception des systèmes de commande des machines d'extraction.

Conformément à la démarche proposée dans la norme, les SIL des fonctions de sécurité devaient être déterminés en fonction des scénarios d'accidents imaginés par les participants, en attribuant des valeurs aux quatre facteurs du risque que sont :

1. la sévérité de la blessure (valeurs de 1 à 4);
2. la fréquence et la durée de l'exposition à la situation dangereuse (valeurs de 2 à 5);
3. la probabilité d'apparition d'un événement dangereux (valeurs de 1 à 5);
4. la probabilité d'évitement ou de limitation d'un dommage (valeurs de 1, 3 ou 5).

Chacune des fonctions de sécurité était associée à un ou plusieurs événements dangereux, eux-mêmes associés ou non à un (ou des) moyen(s) de protection. Plusieurs scénarios d'accident pouvaient être imaginés pour chaque fonction et pour chacun de ces scénarios, l'estimation du risque était reprise. Ces estimations du risque, réalisées par les participants ont permis de déterminer le niveau d'intégrité de sécurité, ou SIL, nécessaire pour chacune des fonctions de sécurité. Après les discussions concernant la liste des fonctions initiales ayant fait l'objet de modifications, l'assignation des SIL n'a été réalisée que pour les fonctions qui étaient considérées comme pertinentes et qui ont été retenues dans le document final.

E.IV Résultats

E.IV.1 Fonctions de sécurité

Les discussions tenues lors de la séance d'analyse du risque ont permis d'identifier les fonctions de sécurité importantes et ont mené l'équipe de recherche à réviser la liste de manière à y incorporer les sous-fonctions de sécurité et les dispositifs de protection jugés nécessaires et ayant un impact sur le plus grand nombre possible de situations dangereuses. Certaines des fonctions originales ont été fusionnées alors que d'autres ont été élaborées à partir des discussions tenues lors de la séance d'analyse du risque.

La liste des fonctions de sécurité, présentée au chapitre 4 de la fiche technique associée, constitue le résultat final de cette réflexion :

1. Protection de la vitesse et de la course du ou des transporteur(s) (limites supérieure et inférieure de parcours du puits);
2. Protection contre une collision du ou des transporteur(s) avec tout obstacle dans le puits ou dans la zone inondée;
3. Protection du personnel et dispositifs de sécurité (mode automatique et mode manuel);
4. Dispositif d'arrêt d'urgence et dispositif de validation;
5. Protection du réarmement du circuit de sécurité;
6. Protection du réseau électrique, du moteur et de la chaîne cinématique;
7. Protection des moyens de freinage;
8. Protections particulières (par exemple : mine profonde, poulie d'adhérence, Blair);
9. Protection du fonctionnement des PES;
10. Protection du fonçage d'un puits.

Cette liste de fonctions de sécurité est générique; en ce sens, elle devrait refléter les particularités du plus grand nombre possible de types de machines d'extraction. Chacune de ces fonctions de sécurité comporte elle-même des sous-fonctions ainsi que des dispositifs de protection (p. ex., évite-mollette) nécessaires à l'atteinte des objectifs de prévention respectifs.

E.IV.II SIL

Toutes les fonctions originales ainsi que leurs scénarios se sont vus attribuer un niveau d'intégrité SIL 3, selon la méthode prescrite dans la norme CEI 62061.

Cependant, il est important de mentionner que lors de ces deux journées de travail, la « probabilité d'apparition d'un événement dangereux » a été choisie librement par les participants, en considérant que les systèmes de protection déjà en place réduisent cette probabilité et que très peu d'incidents de ce type étaient déjà survenus. Cette approche va à l'encontre du principe proposé dans la norme, selon lequel la valeur la plus défavorable par défaut (Pr = 5) de ce paramètre devrait être choisie, sauf si de bons arguments sont utilisés pour en réduire sa valeur.

Il est toutefois intéressant de noter que malgré la sélection de valeurs plus faibles de ce facteur, comme cela a été le cas pendant l'estimation, c'est toujours le SIL 3 qui a été atteint. Ces résultats s'expliquent dans le contexte d'un accident impliquant une machine d'extraction dans laquelle sont transportées des personnes dont la sévérité des blessures serait très élevée (irréversible Se = 4), dont la fréquence et la durée d'exposition sont toujours les mêmes et qui ont été estimées ici à une valeur élevée¹⁰ (Fr = 5) et, finalement, dont la probabilité d'évitement ou de limitation du dommage est considérée comme étant très basse (impossible, ou Av = 5) considérant que les personnes sont « prisonnières » de la cage.

Rappelons que, selon la démarche (A.2.2 de la norme CEI 62061), c'est le SIL le plus élevé des différents scénarios qui doit être retenu pour chaque fonction de sécurité.

Les tableaux suivants résument le résultat de l'estimation du risque pour chacune des six fonctions de sécurité initiales (sous-section E.III.I) ayant fait l'objet d'une estimation complète. Les valeurs assignées à chaque facteur sont mentionnées, et ce, pour les scénarios ayant été imaginés et décrits pour une fonction donnée.

¹⁰ Le transporteur fait environ 80 déplacements par jour, à raison d'une quinzaine de minutes par déplacement, soit quatre voyages à l'heure pendant environ vingt heures par jour. Dans 25 % des cas, il s'agit de déplacements de personnel et 75 %, de déplacements de matériel (proportion variable selon les machines). Cette valeur sera reprise systématiquement dans tous les scénarios étudiés.

Tableau 7. Fonction de sécurité « limitation de la course verticale du transporteur »

Fonction			SIL
Limitation de la course verticale du transporteur.			3
Cette fonction de sécurité a pour objectif de limiter la course verticale du transporteur afin de prévenir tout déplacement incontrôlé au-delà des limites prévues de parcours (réf. ISO 22559-1, adaptée de 6.4.5).			-
Scénario 1 : Limite supérieure mécanique ultime atteinte. Dommages matériels et humains au-delà de cette course.			3
Sévérité	4	Conséquences jugées graves.	-
Fréquence et durée de l'exposition	5	Fréquent. Le transport des personnes est très fréquent dans un quart de travail.	-
Probabilité d'apparition d'un événement dangereux	2	Rare. Le pire scénario étant celui où le transporteur est à pleine vitesse.	-
Possibilité d'évitement ou de limitation d'un dommage	5	Impossible d'éviter le dommage si l'événement dangereux se produit.	-
Scénario 2 : Limite opérationnelle programmée atteinte à pleine vitesse, environ quatre pieds au-dessus du point de déversement.			3
Sévérité	4	Conséquences jugées graves.	-
Fréquence et durée de l'exposition	5	Fréquent. Le transport des personnes est très fréquent dans un quart de travail.	-
Probabilité d'apparition d'un événement dangereux	2	Rare. Le pire scénario étant celui où le transporteur est à pleine vitesse.	-
Probabilité d'évitement ou de limitation d'un dommage	5	Impossible d'éviter le dommage si l'événement dangereux se produit.	-

Tableau 8. Fonction de sécurité « protection des moyens de freinage »

Fonction			SIL
Protection des moyens de freinage.			3
Cette fonction de sécurité a pour objectif de garantir le bon fonctionnement des freins de service et du frein d'urgence de la machine d'extraction. C'est une sous-fonction de la fonction de sécurité globale qui a pour objectif d'empêcher les mouvements incontrôlés de la cage (<i>réf. ISO 22559-1 6.4.6</i>).			-
Scénario 1 : Situation générique pendant laquelle la machine d'extraction ne réussit pas à freiner.			3
Sévérité	4	Conséquences jugées graves.	-
Fréquence et durée de l'exposition	5	Fréquent. Le transport des personnes est très fréquent dans un quart de travail.	-
Probabilité d'apparition d'un événement dangereux	2	Rare.	-
Probabilité d'évitement ou de limitation d'un dommage	5	Impossible d'éviter le dommage si l'événement dangereux se produit.	-

Tableau 9. Fonction de sécurité « protection du fonctionnement »

Fonction		SIL	
Protection du fonctionnement.		3	
Cette fonction de sécurité a pour objectif de garantir le bon fonctionnement de la machine d'extraction. Dès que certains paramètres prédéfinis sortent de leur plage nominale (vitesse en fonction de la position du transporteur, frein partiellement appliqué alors que la cage est en mouvement) ou dès qu'un défaut apparaît (signal de non-fonctionnement d'un dispositif de sécurité), il faut effectuer un arrêt du transporteur en toute sécurité ou déclencher une alarme.		-	
Scénario 1 : Situation générique pendant laquelle il y a perte de contrôle du couple vitesse-position (inclut l'ensemble du système, y compris le freinage)		3	
Sévérité	4	Conséquences jugées graves.	-
Fréquence et durée de l'exposition	5	Fréquent. Le transport des personnes est très fréquent dans un quart de travail.	-
Probabilité d'apparition d'un événement dangereux	2	Rare.	-
Probabilité d'évitement ou de limitation d'un dommage	5	Impossible d'éviter le dommage si l'événement dangereux se produit.	-

Tableau 10. Fonction de sécurité « éviter une collision du transporteur avec tout obstacle dans le puits »

Fonction			SIL
Éviter une collision du transporteur avec tout obstacle dans le puits.			3
Cette fonction de sécurité a pour objectif d'éviter une collision du transporteur avec tout obstacle dans le puits (<i>réf. ISO 22559-1 adaptée de 6.4.7</i>).			-
Scénario 1 : Collision de la cage avec la porte de sécurité pour les travailleurs dans le puits (il est possible de permettre au treuil d'aller s'appuyer à proximité). Le câble peut passer ou non au travers de la porte selon la forme de cette dernière.			3
Sévérité	4	Conséquences jugées graves.	-
Fréquence et durée de l'exposition	5	Fréquent. Le transport des personnes est très fréquent dans un quart de travail.	-
Probabilité d'apparition d'un événement dangereux	4	Probable. Cette valeur est retenue considérant que la détection de la position de la porte est réalisée à l'aide d'un seul interrupteur.	-
Probabilité d'évitement ou de limitation d'un dommage	5	Pratiquement impossible d'éviter le dommage si l'événement dangereux se produit.	-
Scénario 2 : Collision de la cage avec les chaises automatiques/rétractables (skip ou cage).			3
Sévérité	4	Conséquences jugées graves.	-
Fréquence et durée de l'exposition	5	Fréquent. Le transport des personnes est très fréquent dans un quart de travail.	-
Probabilité d'apparition d'un événement dangereux	4	Probable. On estime qu'un accident par année peut survenir suivant ce scénario.	-
Probabilité d'évitement ou de limitation d'un dommage	5	Pratiquement impossible d'éviter le dommage si l'événement dangereux se produit.	-

Tableau 11. Fonction de sécurité « éviter une collision du transporteur avec tout obstacle dans le puits » (suite)

Fonction			
Scénario 3 : Risque d'impact important si de l'eau s'est accumulée dans le fond du puits.			3
Sévérité	4	Conséquences jugées graves.	-
Fréquence et durée de l'exposition	5	Fréquent. Le transport des personnes est très fréquent dans un quart de travail.	-
Probabilité d'apparition d'un événement dangereux	2	L'occurrence de cet événement est considérée comme étant rare du fait de la faible probabilité que de l'eau s'accumule à un haut niveau.	-
Probabilité d'évitement ou de limitation d'un dommage	5	Pratiquement impossible d'éviter le dommage si l'événement dangereux se produit.	-
Scénario 4: Collision d'un skip avec une chaise automatique complètement déployée.			3
Sévérité	4	Conséquences jugées graves. Il y a risque de déversement de roche ou chute d'une partie de la chaise (<i>beam</i> ou autre) dans un autre compartiment lors de la collision.	-
Fréquence et durée de l'exposition	5	Fréquent. Le transport des personnes est très fréquent dans un quart de travail.	-
Probabilité d'apparition d'un événement dangereux	2	L'occurrence de cet événement est considérée comme étant très faible. Ne se produirait qu'après l'erreur d'un opérateur alors que la détection de la position de la chaise est neutralisée (contournée).	-
Probabilité d'évitement ou de limitation d'un dommage	5	La possibilité d'éviter le dommage est considérée comme étant très faible si l'événement dangereux se produit.	-

Tableau 12. Fonction de sécurité « empêcher tous déplacements du transporteur dans une zone inondée du puits »

Fonction			SIL
Empêcher tous déplacements du transporteur dans une zone inondée du puits.			3
Cette fonction de sécurité a pour objectif d'empêcher tous déplacements du transporteur dans une zone inondée du puits.			-
Scénario 1 : Situation générique pendant laquelle la cage est descendue dans l'eau au fond du puits.			3
Sévérité	4	Conséquences jugées graves.	-
Fréquence et durée de l'exposition	5	Fréquent. Le transport des personnes est très fréquent dans un quart de travail.	-
Probabilité d'apparition d'un événement dangereux	2	Rare.	-
Probabilité d'évitement ou de limitation d'un dommage	5	Impossible d'éviter le dommage si l'événement dangereux se produit.	-

Tableau 13. Fonction de sécurité « prévention de la rupture du câble »

Fonction			SIL
Prévention de la rupture du câble.			3
Cette fonction de sécurité a pour objectif d'éviter la rupture du câble. Dès que certains paramètres prédéfinis sortent de leur plage nominale (charge dans le câble, perte de section) ou dès qu'un défaut apparaît (anomalie à la surface du câble), un arrêt en toute sécurité du transporteur doit être effectué ou une alarme doit être déclenchée.			-
Scénario 1 : Rupture du câble à la suite d'une surcharge du transporteur alors qu'il est à l'arrêt (skip plein et personnel présent dans la cage).			3
Sévérité	4	Conséquences jugées graves.	-
Fréquence et durée de l'exposition	5	Fréquent. Le transport des personnes est très fréquent dans un quart de travail.	-
Probabilité d'apparition d'un événement dangereux	1	Très rare étant donné que le câble est conçu avec un facteur de sécurité minimal de 5 et que le transporteur est conçu pour ne pas permettre une surcharge.	-
Probabilité d'évitement ou de limitation d'un dommage	5	Impossible d'éviter le dommage si l'événement dangereux se produit.	-

Tableau 14. Fonction de sécurité « prévention de la rupture du câble » (suite)

Fonction			SIL
Prévention de la rupture du câble.			3
Scénario 2 : Rupture du câble à la suite d'une surcharge du transporteur alors qu'il est à l'arrêt (chargement d'explosifs et personnel présent dans la cage).			3
Sévérité	4	Conséquences jugées graves.	-
Fréquence et durée de l'exposition	5	Fréquent. Le transport des personnes est très fréquent dans un quart de travail.	-
Probabilité d'apparition d'un événement dangereux	1	Très rare, étant donné que le câble est conçu avec un facteur de sécurité de 5 et que le transporteur est conçu pour éviter toute surcharge.	-
Probabilité d'évitement ou de limitation d'un dommage	5	Impossible d'éviter le dommage si l'événement dangereux se produit.	-
Scénario 3 : Mesure d'un changement subit de charge durant le mouvement du transporteur (en montée), câble tendu. Causes possibles : porte du skip ouverte, guides, obstacle ou obstruction non détectés.			3
Sévérité	4	Conséquences jugées graves.	-
Fréquence et durée de l'exposition	5	Fréquent. Le transporteur fait environ 80 déplacements par jour, à raison d'une quinzaine de minutes par déplacement, soit quatre voyages à l'heure pendant environ vingt heures par jour. Dans 25 % des cas, il s'agit de déplacements de personnel et 75 %, de déplacements de matériel (proportion variable selon les machines).	-
Probabilité d'apparition d'un événement dangereux	2	Rare, compte tenu du fait que des inspections hebdomadaires sont réalisées.	-
Probabilité d'évitement ou de limitation d'un dommage	5	Impossible d'éviter le dommage si l'événement dangereux se produit.	-

Les résultats montrent que, de manière générale, les conséquences d'un événement dangereux sont pratiquement toujours jugées comme étant importantes (graves). La fréquence d'exposition à la situation dangereuse est elle aussi très souvent considérée comme étant élevée compte tenu de l'utilisation fréquente de la machine d'extraction pour le transport des personnes dans une journée, à la manière d'un ascenseur. Aussi, lorsqu'un événement dangereux se produit, il n'y a pratiquement jamais de possibilité d'évitement pour les travailleurs qui sont dans la cage. Seul le critère de la probabilité d'occurrence semble faire varier l'ensemble des résultats.

Certaines des fonctions initiales présentées lors de la séance d'analyse du risque ayant été fusionnées et d'autres ayant été constituées à partir des discussions tenues lors de cette même séance, les niveaux de SIL n'ont pas été établis pour l'ensemble des dix fonctions de sécurité de la liste finale de la fiche technique. Ainsi, seulement quatre des fonctions de sécurité de la liste finale, soit les fonctions numéro 1, 2, 7 et 8 présentées plus haut (sous-section E.IV.I), héritent directement des résultats issus de l'estimation du risque et de l'assignation des niveaux de SIL réalisées sur six des fonctions initiales.

Cependant, sachant que le SRECS d'une machine d'extraction sera utilisé pour la supervision de l'ensemble des fonctions de sécurité d'une machine d'extraction et que, par principe, le SRECS doit avoir un niveau d'intégrité de sécurité ou un niveau de performance équivalent ou supérieur à celui nécessaire pour chacune des fonctions de sécurité, il devient nécessaire de faire en sorte que le SRECS d'une machine d'extraction présente les caractéristiques d'un système conçu selon les exigences du SIL 3 en conformité avec la norme CEI 62061, si minimalement une seule des fonctions de sécurité nécessite un SIL 3.

BIBLIOGRAPHIE

- ABB. (2011). *Mine hoist disc brake systems – Improved safety, availability and productivity*. Västerås, Sweden: ABB Mining. Tiré de https://library.e.abb.com/public/5387e7b595ab5a60c125790c004e4e93/ABB_Mine_Hoist_Disc_Brake_Systems_LR.pdf
- Adjadj, A., et Charpentier, D. (2007). *Allocation de SIL requis des fonctions instrumentées de sécurité d'une installation lorsque l'analyse de risque est incomplète*. Communication présentée à Actes du 7ème congrès international Qualita, 20-22 mars, Tanger, Maroc (p. 207-214).
- Baudoin, J., et Bello, J.-P. (2013a). *Aborder la norme NF EN ISO 13849-1 via la conception d'une fonction de sécurité basique* (Rapport n° NS 302).
- Baudoin, J., et Bello, J.-P. (2013b). *Exemple didactique d'application de la norme NF EN 62061* (Rapport n° NS 305).
- Buchweiler, J. P. (2008). Circuits de commande des machines - Un référentiel normatif pour leur conception. *Hygiène et sécurité au travail – Cahiers de notes documentaires, 2e trimestre*(211).
- Buchweiler, J. P. (2009). *IEC/EN 62061, ISO/EN 13849-1 – Dans la pratique, ce qui va changer pour la conception des circuits de commande relatifs à la sécurité*.
- CAN/CSA-M421. (1985). *Use of electricity in mines*. Norme CSA M421. Toronto, ON: Association canadienne de Normalisation.
- CAN/CSA-M421. (1993). *Use of electricity in mines*. Norme CSA M421. Toronto, ON: Association canadienne de Normalisation.
- CAN/CSA-M421. (2000). *Use of electricity in mines*. Norme CSA M421. Toronto, ON: Association canadienne de Normalisation.
- CAN/CSA-M421. (2011). *Use of electricity in mines*. Norme CSA M421. Toronto, ON: Association canadienne de Normalisation.
- CAN/CSA-M421. (2016). *Use of electricity in mines*. Norme CSA M421. Toronto, ON: Association canadienne de Normalisation.
- Canmetmines. (2002). *Guide d'adaptation de la norme sud-africaine SABS0294:2000 et SABS0293:1996*. LMSM-CANMET Rapport 03-038(RC).
- CEI 61508. (2010). *Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité*. Norme CEI 61508. Genève, Suisse: Commission électrotechnique internationale.
- CEI 61511. (2016). *Sécurité fonctionnelle – Systèmes instrumentés de sécurité pour le domaine de la production par processus – Partie 1 : cadre, définitions, exigences pour le système, le matériel et le logiciel – Sécurité fonctionnelle – Systèmes instrumentés de sécurité pour le domaine de la production par processus – Norme CEI 61511*. Genève, Suisse: Commission électrotechnique internationale.
- CEI 62061. (2005). *Sécurité des machines – Sécurité fonctionnelle des systèmes de commande électriques, électroniques et électroniques programmables relatifs à la sécurité*. Norme CEI 62061. Genève, Suisse: Commission électrotechnique internationale.
- CSA-Z432. (2004). *Protection des machines*. Norme CSA Z432. Toronto, ON: Association canadienne de Normalisation.
- CSA-Z432. (2016). *Protection des machines*. Norme CSA Z432. Toronto, ON: Association canadienne de Normalisation.

- EN 81-20. (2014). *Règles de sécurité pour la construction et l'installation des ascenseurs – Ascenseurs pour le transport de personnes et d'objets – Partie 20 : ascenseurs et ascenseurs de charge*. Norme EN 81-20. Saint-Denis, France: Association française de normalisation.
- Fortin, G., et Demers, R. (2011). *Les machines d'extraction*. CSST.
- Galloway, L. C., et Tiley, G. L. (1986). Mine hoist braking systems. *CIM Bulletin*, 79(894), 50-60. Tiré de <http://search.proquest.com/professional/docview/777706799?accountid=153899>
- Galy, B., et Giraud, L. (2016a). Mine conveyance safety: The evolution and regulation of safety catches. *CIM Journal*, 7(1). Tiré de <http://dx.doi.org/10.15834/cimj.2016.27>
- Galy, B., et Giraud, L. (2016b). Mine hoist safety: Regulations and proposed improvements to risk-mitigation strategies. *CIM Journal*, 7(4). Tiré de <http://dx.doi.org/10.15834/cimj.2016.27>
- Garbolino, E., et Guarnieri, F. (2012). Concept de défense en profondeur : contribution à la sécurité des ICPE. *Techniques de l'ingénieur – SE 2 065*.
- Giraud, L., et Galy, B. (2015). *Modernisation des parachutes de transporteurs de mines – Volet 3 - Perte de contrôle de la cage* (Rapport n° 2013-0074).
- Giraud, L., et Galy, B. (2018). Fault tree analysis and risk mitigation strategies for mine hoists. *Safety Science*, 110 222-234. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.08.010>
- Iddir, O. (2012a). Évaluation de la probabilité de défaillance d'un Système Instrumenté de Sécurité (SIS). *Techniques de l'ingénieur - SE 4 058*.
- Iddir, O. (2012b). Méthode LOPA : principe et exemple d'application. *Techniques de l'ingénieur – SE 4 075*.
- Iddir, O. (2014). Mesures de maîtrise des risques instrumentées (MMRI). *Techniques de l'ingénieur – SE 2 090*.
- ISA. (2005). *Guide d'interprétation et d'application de la norme IEC 61508 et des normes dérivées IEC 61511 (ISA S84.01) et IEC 62061: Instrumentation, Systems and Automation Society - Section France*.
- ISO 12100. (2010). *Sécurité des machines – Principes généraux de conception – Appréciation du risque et réduction du risque*. Norme ISO 12100. Genève, Suisse: Organisation internationale de normalisation.
- ISO 13849-1. (2015). *Sécurité des machines -- Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité – Partie 1 : Principes généraux de conception*. Norme ISO 13849-1. Genève, Suisse: Organisation internationale de normalisation.
- ISO 14121. (2007). *Sécurité des machines – Appréciation du risque – Partie 1 : Principes*. Norme ISO 14121. Genève, Suisse: Organisation internationale de normalisation.
- ISO 14798. (2009). *Ascenseurs, escaliers mécaniques et trottoirs roulants – Méthodologie de l'appréciation et de la réduction du risque*. Norme ISO 14798. Genève, Suisse: Organisation internationale de normalisation.
- ISO 22559-1. (2014). *Exigences de sécurité des ascenseurs – Partie 1 : Exigences essentielles de sécurité mondiales des ascenseurs (GESR)*. Norme ISO 22559-1. Genève, Suisse: Organisation internationale de normalisation.
- ISO/TR 23849. (2010). *Lignes directrices relatives à l'application de l'ISO 13849-1 et de la CEI 62061 dans la conception des systèmes de commande des machines relatifs à la sécurité*. Norme ISO/TR 23849. Genève, Suisse: Organisation internationale de normalisation.
- Lanternier, B., et Adjadj, A. (2008). Allocation de niveau d'intégrité de sécurité (SIL) requis conformément à la norme CEI 61511. *Revue internationale sur l'Ingénierie des Risques Industriels*, 1(1).

- Leonida, C. (2013). Taking the strain. *Mining Magazine*, 20 Fev 2013.
- LSST. (2018). *Loi sur la santé et la sécurité du travail – S-2.1*. Québec, QC: Éditeur officiel du Québec.
- Mowrey, G. L., Fisher, T. J., Sammarco, J. J., et Fries, E. F. (2002). *Programmable Electronic Mining Systems: Best Practice Recommendations – Part 4 : 3.0. Safety file* (Rapport n° 2002-134).
- Ontario regulation 854. (2017). *Occupational Health and Safety Act, Mines and mining plants*.
- Paques, J.-J., et Germain, L. (2005). *Sécurité des machines d'extraction commandées par systèmes programmables* (Rapport n° RF-412).
- RSSM. (2018). *Règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines – S-2.1, r. 14*. Québec, QC: Éditeur officiel du Québec.
- RSST. (2018). *Règlement sur la santé et la sécurité du travail – S-2.1, r.13*. Québec, QC: Éditeur officiel du Québec.
- SABS 0293. (1996). *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*. Pretoria, Republic of South Africa: South African Bureau of Standards (version française : CSST).
- SABS 0294. (2000). *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*. Pretoria, Republic of South Africa: South African Bureau of Standards (version française : CSST).
- Sammarco, J. J. (2005). *Programmable Electronic Mining Systems: Best Practice Recommendations - Part 6 : 5.1. System safety guidance* (Rapport n° 2005-150).
- Sammarco, J. J. (2006). *Programmable Electronic Mining Systems: Best Practice Recommendations – Part 8 : 6.0 Safety file guidance* (Rapport n° 2006-130).
- Sammarco, J. J., et Fisher, T. J. (2001). *Programmable Electronic Mining Systems: Best Practice Recommendations – Part 2 : 2.1. System safety* (Rapport n° 2001-137).
- Sammarco, J. J., Fisher, T. J., et Jobes, C. C. (2001). *Programmable Electronic Mining Systems: Best Practice Recommendations – Part 3 : 2.2. Software safety* (Rapport n° 2001-164).
- Sammarco, J. J., Fisher, T. J., Welsh, J. H., et Pazuchanics, M. J. (2001). *Programmable Electronic Mining Systems: Best Practice Recommendations – Part 1 : 1.0 Introduction* (Rapport n° 2001-132).
- Sammarco, J. J., et Flynt, J. S. (2006). *Programmable Electronic Mining Systems: Best Practice Recommendations – Part 9 : 7.0 Independent functional safety assessment guidance* (Rapport n° 2006-131).
- Sammarco, J. J., et Fries, E. F. (2003). *Programmable Electronic Mining Systems: Best Practice Recommendations – Part 5 : 4.0. Independent Functional Safety Assessment* (Rapport n° 2003-138).
- Sparg, E. N. (1995). Developments in hoist design technology applied to a 4000 metre deep shaft. *Mining Technology*, 77(886), 179-184.