

Titre: Étude exploratoire des risques en santé et sécurité du travail liés à l'utilisation des véhicules autonomes en mines souterraines et proposition d'une démarche de prévention
Title:

Auteur: Gaston Deferre Dingong Hen
Author:

Date: 2025

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Dingong Hen, G. D. (2025). Étude exploratoire des risques en santé et sécurité du travail liés à l'utilisation des véhicules autonomes en mines souterraines et proposition d'une démarche de prévention [Master's thesis, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/71473/>
Citation:

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/71473/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Firdaous Sekkay, & Michel Gamache
Advisors:

Programme: Maîtrise recherche en génie industriel
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Étude exploratoire des risques en santé et sécurité du travail liés à l'utilisation des véhicules autonomes en mines souterraines et proposition d'une démarche de prévention

GASTON DEFERRE DINGONG HEN

Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie industriel

Décembre 2025

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Étude exploratoire des risques en santé et sécurité du travail liés à l'utilisation des véhicules autonomes en mines souterraines et proposition d'une démarche de prévention

présenté par **Gaston Deferre DINGONG HEN**

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

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

Yuvín Adnarain CHINNIAH, président

Firdaous SEKKAY, membre et directrice de recherche

Michel GAMACHE, membre et codirecteur de recherche

Aida HAGHIGHI, membre

DÉDICACE

À mes parents, frères et sœurs

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce projet de recherche a été possible grâce aux conseils, au soutien et à la collaboration de nombreuses personnes que je tiens à remercier.

Je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à ma directrice de recherche Madame Firdaous SEKKAY et mon co-directeur de recherche Monsieur Michel Gamache pour leur accompagnement tout au long de la rédaction de ce mémoire. Leur expertise, leur conseils éclairés et leurs démarches ont largement contribué à l'orientation et à la qualité de ce travail.

Mes remerciements s'adressent également au Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) dans le cadre des programmes FONCER et "À la découverte" pour le financement partiel de ce projet de recherche. Ce soutien financier m'a permis de me consacrer entièrement à ce projet.

Ma reconnaissance va également à mes professeurs, professeures et à Polytechnique Montréal pour l'encadrement déployé au quotidien pour la réussite de mes études.

Je souhaite remercier ma grand-mère, mes parents, mes frères et sœurs, mes oncles et tantes pour l'amour et le soutien moral qu'ils m'ont apporté à chaque étape de ce projet.

Je ne terminerai pas sans dire un grand merci à l'Éternel Dieu pour tout ce qu'il accomplit chaque jour dans ma vie et celle de ma famille.

À toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, je vous exprime ma profonde gratitude.

RÉSUMÉ

L'introduction des véhicules autonomes dans les mines souterraines marque une étape majeure dans la transformation numérique et opérationnelle de l'industrie minière. Ces technologies promettent des gains significatifs en sécurité, productivité et efficacité, mais elles apportent probablement de nouveaux risques physiques, technologiques, humains et organisationnels encore peu étudiés. Dans un contexte où les travaux scientifiques sur la sécurité des systèmes autonomes en milieu souterrain demeurent rares, et où une certaine réticence persiste parmi les acteurs du secteur face à cette technologie de pointe, plusieurs questions majeures sont soulevées :

- Quels sont les risques émergents SST liés à l'exploitation des véhicules autonomes en milieu souterrain ?
- Quels sont les avantages et les défis associés à leur introduction dans les opérations minières souterraines ?
- Quelle démarche d'intégration permet d'assurer une mise en œuvre sécuritaire de ces technologies ?
- Et enfin, quelle méthode d'évaluation des risques est la mieux adaptée à ces systèmes complexes ?

Toutes ces interrogations ont permis de ressortir une question centrale de recherche : comment introduire et utiliser de façon sécuritaire des véhicules autonomes dans une mine souterraine ? Ainsi, l'objectif général de notre étude est de réaliser une analyse exploratoire des risques liés à l'utilisation des véhicules autonomes dans les mines souterraines et de proposer une démarche de prévention préliminaire, fondée sur les connaissances scientifiques et normatives existantes. Pour répondre à cet objectif, nous avons défini une méthodologie composée de deux grandes parties.

La première partie a consisté à réaliser une revue documentaire comprenant deux niveaux. Le premier niveau a consisté à effectuer une recherche documentaire approfondie enrichie par une analyse critique sur les travaux scientifiques qui ont abordé la sécurité liée aux véhicules autonomes exploités dans les mines souterraines. Quant au second niveau, il a consisté à faire une analyse croisée entre les directives du Global Mining Guidelines Group (GMG) sur la mise en œuvre des systèmes autonomes dans l'exploitation minière et les travaux de Burgess-Limerick sur les facteurs humains.

La deuxième partie de notre méthodologie a consisté à faire une combinaison des normes ISO 12100 : 2010 et ISO 17757 : 2019. Cette combinaison a permis de mettre en évidence les complémentarités et les spécificités de chacune :

- l'ISO 12100 fournit le cadre général de la gestion des risques pour les machines industrielles, fondé sur l'identification des dangers, l'estimation et la réduction du risque ;
- l'ISO 17757, quant à elle, introduit les exigences particulières liées aux systèmes autonomes et semi-autonomes, notamment la sécurité fonctionnelle, la communication homme-système, la détection d'obstacles et la gestion des modes de fonctionnement.

Cette méthodologie a permis d'obtenir plusieurs résultats. La revue documentaire a permis de ressortir les avantages et défis liés à l'intégration de ces véhicules en milieu souterrain sur le plan de la sécurité, des coûts, de l'efficacité et la production, et des ressources humaines.

Ensuite, nous avons identifié et catégorisé les nouveaux risques liés à ces véhicules en quatre types :

- Risques physiques : collision due à l'interaction entre les véhicules autonomes, les véhicules manuels et les personnes, l'instabilité du véhicule autonome due à des sols irréguliers, des pentes et des virages, les troubles musculosquelettiques dus à des interfaces utilisateur inadaptées en salle de commande, etc.
- Risques technologiques : défaillances des capteurs de perception, perte de communication, attaques cybernétiques, etc.
- Risques cognitifs : fatigue mentale (due à une vigilance prolongée), le travail assis sur un fauteuil (pouvant entraîner des problèmes ergonomiques et du sommeil car l'opérateur est déconnecté de l'environnement de travail réel), la supervision des opérations à distance (entraîne une surcharge cognitive liée à la surveillance simultanée de plusieurs interfaces ou véhicules autonomes), les erreurs de mode ou de saisie, etc.
- Risques psychosociaux : l'isolement croissant dans les salles de commande affecte l'opérateur sur plusieurs points tels que la motivation, le sentiment d'exclusion du collectif de travail traditionnel, ce qui peut générer du stress.

Nous avons également présenté les retours d'expérience des cas d'implantation de véhicules autonomes documentés dans la littérature.

Par ailleurs, la revue documentaire a également permis de proposer une démarche d'intégration sécuritaire des véhicules autonomes dans une mine souterraine. Cette démarche couvre six dimensions essentielles pour une bonne mise en œuvre :

- La réglementation : les acteurs de l'intégration devraient s'appuyer dès le début de la démarche sur les normes internationales telles que l'ISO 12100 : 2010 sur la sécurité des machines, l'ISO 17757 : 2019 sur la sécurité des systèmes autonomes et semi-autonomes dans l'exploitation minière, la partie 1 de la norme 13849 sur les principes généraux de conception des systèmes de commande relatifs à la sécurité des machines, etc. Toutefois, les acteurs devraient également prendre en compte les exigences réglementaires locales du pays ou de la région où la mine est exploitée ;
- La gestion du changement ;
- La définition des rôles et des responsabilités des parties prenantes lors de l'intégration ;
- La gestion des zones de fonctionnement autonome et des accès ;
- La gestion des données ;
- La mise en service.

La combinaison des référentiels ISO 12100 : 2010 et ISO 17757 : 2019 a permis de proposer une méthodologie d'évaluation des risques adaptée aux véhicules autonomes, et d'introduire le critère de détectabilité/maîtrise de la défaillance pour les opérations autonomes ne nécessitant pas de présence humaine. Trois niveaux de détectabilité ont été définis allant de la détection inexistante à la détection rapide. De plus, nous avons définis une matrice de criticité à cinq niveaux allant du risque négligeable au risque inacceptable majeur.

Ensuite, la méthode a été appliquée à deux scénarios réels survenus dans des mines à ciel ouvert (collision entre un camion de transport autonome et une chargeuse manuelle lors d'une opération de chargement de minerai, erreur de mode par l'opérateur à bord d'un camion de transport autonome) et documentés dans la littérature afin de tester sa pertinence.

Au-delà des aspects techniques, ce travail met également en lumière l'importance des dimensions humaines, organisationnelles et psychosociales dans la réussite d'une intégration sécuritaire. En somme, ce mémoire pose les bases conceptuelles et méthodologiques d'une démarche de prévention pouvant être approfondie et validée dans des travaux ultérieurs afin de rendre les mines souterraines autonomes plus sûres, plus fiables et plus durables.

ABSTRACT

The introduction of autonomous vehicles in underground mines marks a major step in the digital and operational transformation of the mining industry. These technologies promise significant gains in safety, productivity, and efficiency, but they likely introduce new, understudied physical, technological, human, and organizational risks. In a context where scientific research on the safety of autonomous systems in underground environments remains scarce, and where industry stakeholders remain reluctant to embrace this cutting-edge technology, several major questions arise:

- What is the emerging OHS risks associated with the operation of autonomous vehicles in underground environments?
- What are the benefits and challenges associated with their introduction into underground mining operations?
- What integration approach can ensure the safe implementation of these technologies?
- And finally, what risk assessment method is best suited to these complex systems?

All these questions led to the emergence of central research question: how can autonomous vehicles be safely introduced and operated in an underground mine? Thus, the overall aim of our study is to manage the health and safety risks associated with the use of autonomous vehicles in underground mines. To achieve this objective, we have defined a methodology consisting of two main parts.

The first part consisted of conducting a literature review comprising two levels. The first level involved carrying out in-depth documentary research enriched by a critical analysis of the scientific studies that addressed safety related to autonomous vehicles operated in underground mines. As for the second level, it consisted of performing a cross-analysis between the Global Mining Guidelines Group (GMG) directives on the implementation of autonomous systems in mining and the work of Burgess-Limerick on human factors.

The second part of our methodology involved combining ISO 12100:2010 and ISO 17757:2019 standards. This combination highlighted the complementarities and specificities of each :

- ISO 12100 provides the general framework for risk management for industrial machines, based on hazard identification, risk estimation, and risk reduction.
- ISO 17757, on the other hand, introduces specific requirements related to autonomous and semi-autonomous systems, including functional safety, human-system communication, obstacle detection, and operating mode management.

This methodology made it possible to obtain several results. The literature review highlighted the advantages and challenges related to the integration of these vehicles in underground environments in terms of safety, costs, efficiency, production, and human resources.

Next, we identified and categorized the new risks related to these vehicles into four types:

- Physical risks: collisions due to interactions between autonomous vehicles, manual vehicles, and people; instability of the autonomous vehicle due to uneven surfaces, slopes, and turns; musculoskeletal disorders caused by inappropriate user interfaces in the control room, etc.
- Technological risks: failures of perception sensors, communication loss, cyberattacks, etc.
- Cognitive risks: mental fatigue (due to prolonged vigilance), chair-based work (which can lead to ergonomic problems and sleep issues because the operator is disconnected from the real work environment), remote supervision of operations (leads to cognitive overload related to simultaneous monitoring of multiple interfaces or autonomous vehicles), mode or input errors, etc.
- Psychosocial risks: increasing isolation in control rooms affects operators in several ways, such as motivation and feelings of exclusion from the traditional work community, which can cause stress.

We also presented the feedback from documented cases of autonomous vehicle deployments in the literature.

Furthermore, the literature review also allowed us to propose an approach for the safe integration of autonomous vehicles in an underground mine. This approach covers six essential dimensions for successful implementation, namely:

- Regulations: Integration stakeholders should rely from the beginning of the process on international standards such as ISO 12100:2010 on the safety of machinery, ISO 17757:2019 on the safety of autonomous and semi-autonomous systems in mining

operations, Part 1 of ISO 13849 on general principles for the design of safety-related control systems for machinery, etc. However, stakeholders should also consider local regulatory requirements of the country or region where the mine is operated;

- Change management;
- Defining the roles and responsibilities of integration stakeholders;
- Management of autonomous operating zones and access;
- Data management;
- Commissioning.

The combination of the ISO 12100:2010 and ISO 17757:2019 standards has made it possible to propose a risk assessment methodology adapted to autonomous vehicles and to introduce the criterion of fault detectability/control for autonomous operations that do not require human presence. Three levels of detectability have been defined, ranging from non-existent detection to rapid detection. In addition, we have defined a five-level criticality matrix ranging from negligible risk to major unacceptable risk.

Then, the method was applied to two real-world scenarios (a collision between an autonomous transport truck and a manually operated loader during a ore loading operation, a mode error by the operator aboard an autonomous transport truck) documented in the literature in order to test its relevance.

Beyond the technical aspects, this work also highlights the importance of human, organizational, and psychosocial dimensions in the successful implementation of safe integration. In short, this thesis lays the foundations for a systemic, normative, and pragmatic approach in favor of a transition to safer, more reliable, and more sustainable underground mines.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VIII
TABLE DES MATIÈRES	XI
LISTE DES TABLEAUX.....	XV
LISTE DES FIGURES.....	XVI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVII
LISTE DES ANNEXES.....	XIX
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte général des mines souterraines	1
1.2 Statistiques d’accidents de travail dans les mines souterraines.....	2
1.3 Problématique SST liée aux véhicules autonomes en milieu souterrain.....	4
1.4 Motivation sur une étude sur les risques pour la SST liés à ces véhicules	5
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	6
2.1 Environnement minier souterrain et enjeux SST	6
2.1.1 Contexte des mines souterraines	6
2.1.2 Risques SST et enjeux de prévention	7
2.2 Automatisation et engins miniers autonomes.....	8
2.2.1 Définition et niveaux d’autonomie des véhicules	9
2.2.2 Panorama technologique des véhicules autonomes	10
2.2.3 Les véhicules autonomes dans les mines	13

2.2.4	Les véhicules autonomes dans les mines souterraines	15
2.3	Cadre de gestion des risques	17
2.3.1	Normes et référentiels existants	17
2.3.2	Méthodes existantes de gestion des risques	20
2.3.2.1	Méthodes classiques de gestion des risques	20
2.3.2.2	Limites des approches traditionnelles dans les mines souterraines mobiles autonomes.....	24
2.3.2.3	Méthodes émergentes de gestion des risques liées aux véhicules autonomes en milieu souterrain.....	25
2.4	Synthèse et lacunes identifiées dans la littérature	31
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE	34
3.1	Objectif général	34
3.2	Objectifs spécifiques	34
3.3	Questions de recherche.....	34
3.4	Méthodologie de l'étude.....	35
3.4.1	Revue documentaire	35
3.4.1.1	Collecte des données	36
3.4.1.2	Analyse des données	36
3.4.2	Méthodologie d'une démarche d'intégration sécuritaire des véhicules autonomes dans une mine souterraine	37
3.4.2.1	Méthode d'analyse croisée	38
3.4.2.2	Construction de la démarche d'intégration	38
3.4.3	Développement d'une méthodologie de gestion des risques	40
3.4.3.1	Spécificités des deux référentiels	40
3.4.3.2	Justification du choix des deux normes.....	41

3.4.3.3	Construction de la démarche méthodologique de gestion des risques	42
CHAPITRE 4	RÉSULTATS	44
4.1	Avantages et défis de l'intégration des véhicules autonomes dans une mine souterraine	44
4.2	Enjeux de SST et risques liés aux véhicules autonomes dans les mines souterraines ...	46
4.2.1	Risques émergents associés à l'autonomie des véhicules autonomes en milieu souterrain	46
4.2.1.1	Risques physiques	46
4.2.1.2	Risques technologiques	48
4.2.1.3	Risques cognitifs	50
4.2.1.4	Risques psychosociaux.....	50
4.2.2	Transformation des rôles et responsabilités des travailleurs	52
4.3	Véhicules autonomes en milieu souterrain : retour d'expériences et enseignements de cas réels d'intégration.....	53
4.3.1	Facteurs humains, organisationnels et techniques.....	54
4.3.1.1	Facteurs humains	54
4.3.1.2	Facteurs organisationnels et gestion du changement	55
4.3.1.3	Facteurs techniques et défis opérationnels	56
4.3.1.4	Difficultés rencontrées et limites observées.....	57
4.3.1.5	Leviers et conditions de succès pour une intégration réussie.....	58
4.4	Proposition d'une démarche d'intégration	59
4.4.1	Réglementation.....	60
4.4.1.1	Processus d'intégration réglementaire	60
4.4.1.2	Adaptation au contexte québécois.....	62
4.4.2	Gestion du changement	62

4.4.3	Responsabilités des parties prenantes	62
4.4.4	Zones autonomes et gestion des accès	63
4.4.5	Gestion des données	63
4.4.6	Mise en service.....	64
4.5	Proposition de méthode intégrée de gestion des risques	68
4.6	Démarche de la méthode	69
4.7	Application de la méthode sur deux scénarios concrets.....	76
CHAPITRE 5 DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS		85
5.1	Rappel des principaux résultats.....	85
5.2	Interprétation des résultats	85
5.2.1	Risques émergents SST	85
5.2.2	Démarche d'intégration.....	86
5.2.3	Méthode intégrée de gestion des risques.....	87
5.3	Comparaison des résultats avec d'autres approches de la littérature	88
5.4	Apports de la recherche.....	89
5.5	Limites de la recherche	90
5.6	Avenues de recherche.....	91
CHAPITRE 6 CONCLUSION		92
RÉFÉRENCES.....		94
ANNEXES		102

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Statistiques des accidents de travail dans les mines souterraines.....	3
Tableau 2.1 Niveaux d'autonomie des véhicules adaptés de la SAE. © Gronier et al., 2019. Reproduit avec permission.	10
Tableau 2.2 Échelle de niveau des paramètres d'estimation du risque.....	21
Tableau 3.1 Analyse croisée des recommandations du GMG et de Burgess-Limerick.....	39
Tableau 3.2 Combinaison des spécificités des normes ISO 12100 : 2010 et ISO 17757 : 2019 ..	43
Tableau 4.1 Avantages et obstacles de l'intégration des véhicules autonomes dans les mines souterraines.....	44
Tableau 4.2 Tableau de synthèse normatif.....	61
Tableau 4.3 Adaptation réglementaire au Québec	62
Tableau 4.4 Liste de contrôle intégration sécuritaire des véhicules autonomes dans une mine souterraine	66
Tableau 4.5 Typologie des dangers.....	70
Tableau 4.6 Critères d'estimation de risques	71
Tableau 4.7 Matrice de criticité.....	74
Tableau 4.8 Évaluation des risques - scénario 1	78
Tableau 4.9 Mesures de réduction du risque – scénario 1	81
Tableau 4.10 Évaluation des risques – scénario 2.....	82
Tableau 4.11 Mesures de réduction du risque – scénario 2	84

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Description d’une mine souterraine. © Imam et al., 2023. Reproduit avec permission	2
Figure 2.1 Composants d’un véhicule autonome. © Bathla et al., 2022. Reproduit avec permission	11
Figure 2.2 Description du système de perception et de décision du véhicule autonome. © Lakomicki et al., 2018. Reproduit avec permission	12
Figure 2.3 Modèle de maturité de l’automatisation minière. © GMG, 2023. Reproduit avec autorisation (traduction en français par nos soins)	14
Figure 2.4 Estimation du risque par l’outil CSST-IRSST	23
Figure 3.1 Méthodologie adoptée pour la réalisation de l’étude	35
Figure 4.1 Risques émergents SST dans une mine souterraine mobile autonome	51
Figure 4.2 Cadre intégré pour l’introduction des véhicules autonomes dans une mine souterraine	60
Figure 4.3 Méthode d’évaluation des risques liés aux véhicules autonomes en milieu souterrain	69

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AMDEC : Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité

AMQ : Association minière du Québec

APR : Analyse préliminaire des risques

CNESST : Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail

CSA : Canadian Standards Association / Association canadienne de normalisation

EPI : Équipement de protection individuelle

FEO : Fabricant d'équipements d'origine

GMG : Global Mining Guidelines Group

IA : Intelligence artificielle

IRSST : Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail

ISO : International Organization for Standardization / Organisation internationale de normalisation

LHD : Load Haul Dump/ chargement transport déchargement

MIMO-OFDM : Multiple-Input Multiple Output – Orthogonal Frequency Division Multiplexing /
Entrées multiples et sorties multiples – Multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence

MRR : Mesures de réduction du risque

MSHA : Mine Safety and Health Administration

MTMD : Ministère des transports et de la mobilité durable

PIB : Produit Intérieur Brut

RFID : Radio Frequency Identification

RSST : Règlement sur la santé et la sécurité du travail

SAAQ : Société de l'assurance automobile du Québec

SAE : Society of Automotive Engineers International / Société internationale des ingénieurs automobiles

SST : Santé sécurité du travail

STAMP : System Theoretic Accident Model and Processes / Modèle et processus d'accident théorique des systèmes

STPA : System-Theoretic Process Analysis / Analyse des processus théoriques des systèmes

V2I : Véhicule à infrastructure

V2V : Véhicule à véhicule

VA : Véhicule autonome

ZFA : Zone de fonctionnement autonome

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A GESTION DU CHANGEMENT.....	102
ANNEXE B RESPONSABILITÉS DES PARTIES PRENANTES.....	105
ANNEXE C ZONES AUTONOMES ET GESTION DES ACCÈS	106
ANNEXE D MATRICE DE COMBINAISON DE LA CRITICITÉ	108

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Au cours de ce chapitre, nous allons présenter le contexte général des mines souterraines, les statistiques d'accidents de travail dans les mines souterraines et la problématique SST liée aux engins autonomes.

1.1 Contexte général des mines souterraines

L'exploitation d'une mine consiste à extraire le minerai, c'est-à-dire des couches de la croûte terrestre contenant des minéraux ou des métaux utiles en proportion suffisamment rentable pour justifier leur exploitation (Matheus, 2018). D'après l'Association minière du Québec (2017), il existe deux (02) types de mines au Québec : la mine à ciel ouvert et la mine souterraine. Le choix du type de mine à réaliser dans une exploitation dépend de plusieurs facteurs notamment la profondeur du gisement, son empreinte au sol, son contexte géologique et géomorphologique, sa géométrie et les coûts d'extraction (Matheus, 2018). Dans une mine à ciel ouvert, le minerai se trouve près de la surface. On creuse des couches de roche préalablement forées et dynamitées et on enlève avec une pelle mécanique ou une chargeuse. La roche est sortie de la mine à l'aide des camions. En revanche, la mine souterraine est l'option privilégiée lorsque le minerai est situé en profondeur. Pour accéder au minerai, on creuse des puits ou des rampes à partir de la surface au moyen de forage et de dynamitage. À partir du puits ou de la rampe, on creuse par la suite des galeries horizontales dans le sous-sol afin d'atteindre les zones minéralisées. Les galeries, situées sur différents niveaux de profondeurs, sont reliés par des rampes. Les rampes et les puits permettent de transporter les ouvriers et l'équipement et pour remonter le minerai à la surface (Association minière du Québec, 2017). Les équipements fréquemment utilisés pour le transport des matériaux (minerai, mort-terrain, etc.) dans les mines souterraines sont les tombereaux et les véhicules à benne basculante (LHD, en anglais Load Haul Dump) (Imam et al., 2023). À cet effet, Imam et al. (2023) présentent une visualisation de cet environnement souterrain. Cela est illustré par la figure 1.1.

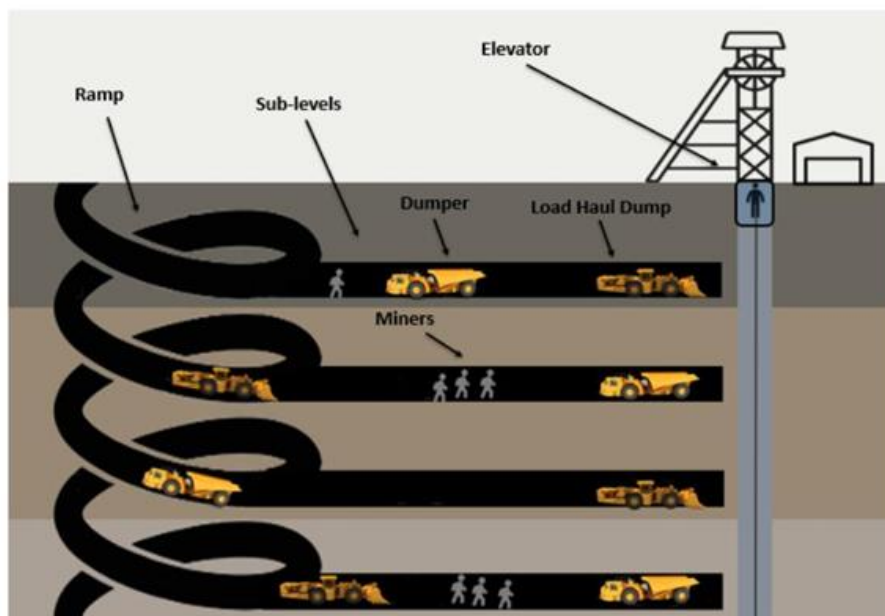


Figure 1.1 Description d'une mine souterraine. © Imam et al., 2023. Reproduit avec permission

1.2 Statistiques d'accidents de travail dans les mines souterraines

Le travail en milieu souterrain présente de nombreux risques spécifiques. Les travailleurs y sont exposés à des dangers environnementaux (absence de lumière naturelle, présence de poussières, de gaz, ou d'aérosols toxiques), spatiaux (espaces confinés, encombrement, obstacles physiques) et opérationnels (circulation d'engins lourds, risques d'éboulement, d'effondrement ou d'accidents liés aux activités minières) (DatiPlus, 2024).

Ces conditions de travail particulières font des mines souterraines des environnements à haut risque, où la fréquence et la gravité des accidents de travail ainsi que l'incidence des maladies professionnelles demeurent élevées. Ces accidents peuvent être causés par des effondrements de galeries, des collisions entre véhicules, des chutes d'objets, ou encore par une exposition prolongée à des agents chimiques ou à des vibrations.

Le tableau 1.1 présente une synthèse des statistiques d'accidents de travail recensés dans les mines souterraines à l'échelle mondiale, permettant d'illustrer l'ampleur des enjeux de santé et de sécurité dans ce secteur.

Tableau 1.1 Statistiques des accidents de travail dans les mines souterraines

Pays	Année	Statistiques	Références
Canada	2023	Un total de 6 567 accidents avec perte de temps a été enregistré dans le secteur de l'extraction minière, de l'exploitation en carrière et de l'extraction de pétrole et de gaz, entraînant 50 décès.	(Association des commissions des accidents du travail du Canada, 2023)
États-Unis	2010 - 2023	Sur cette période, le secteur minier souterrain a enregistré 185 décès pour une moyenne de 15 décès par an	(U.S Department of Labour - Mine Health and Safety Administration, 2025)
France	2017 - 2022	Les industries extractives (mines souterraines, mines à ciel ouvert, carrières, etc.) ont enregistré 3390 accidents de travail sur cette période	(Ministère du Travail - Direction de l'animation de la recherche, des études et des statistiques - DARES, 2024)
Australie	2003 - 2015	Le taux d'accidents mortels dans l'industrie minière a diminué de 65 %, passant de 12,4 accidents mortels pour 100 000 travailleurs en 2003 à 4,4 en 2015. L'industrie minière a été classé au troisième rang des secteurs les plus meurtriers, avec une moyenne de 9 travailleurs décédés chaque année.	(Safe Work Australia, 2025)

Les statistiques susmentionnées mettent en évidence l'importance de l'accidentologie dans les mines souterraines à travers le monde. Cette tendance peut s'expliquer en grande partie par les contraintes propres à cet environnement de travail. Dans une étude sur l'avenir de la sécurité minière, Imam et al. (2023) ont identifié six sources d'accidents de travail dans l'exploitation minière souterraine notamment : travaux électriques, explosions, incendies, matériaux, machines, chute de blocs.

Au Québec, 566 accidents de travail ont été recensés dans l'ensemble du secteur minier en 2018. En 2021, les mines souterraines représentaient à elles seules 34 % de l'ensemble des accidents survenus dans cette industrie (Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail - CNESST, 2024). Bien qu'ils ne soient pas les premiers à l'avoir souligné, Corke et al. (2008) ont mis en évidence le potentiel des systèmes robotiques avancés pour réduire l'exposition des travailleurs miniers aux risques de décès, de blessures, ainsi qu'à divers dangers pour la santé, tels que le bruit, les vibrations, la poussière et les particules de diesel. Toutefois, il s'avère nécessaire d'apprécier les enjeux SST liés à ces systèmes et particulièrement ceux associés aux véhicules autonomes.

1.3 Problématique SST liée aux véhicules autonomes en milieu souterrain

Le développement des technologies autonomes transforme radicalement l'industrie minière, notamment les environnements souterrains. L'intégration des véhicules autonomes a pour objectif d'augmenter la productivité et de réduire l'exposition des travailleurs aux zones dangereuses d'une mine souterraine. Dans son rapport de 2020 portant sur les retombées économiques de l'industrie minière au Québec, l'Association minière du Québec (2022) met en évidence la contribution significative de ce secteur à l'économie de la province. Le rapport permet de mesurer l'ampleur de ces retombées, notamment en termes d'emplois créés ou maintenus, de participation au produit intérieur brut (PIB) du Québec, des revenus générés pour les finances publiques, ainsi que de leur répartition sur l'ensemble des régions québécoises. Bien que cette nouvelle technologie permette d'éloigner les opérateurs des zones dangereuses (évitant ainsi les risques d'écrasement, d'inhalation de gaz toxiques, etc.), elle ne fait pas consensus parmi les parties concernées (professionnels SST, chercheurs, industriels, etc.) notamment en ce qui concerne l'atteinte du risque 0 et l'émergence de nouveaux enjeux en santé et sécurité du travail (SST). Ces enjeux concernent entre autres les dysfonctionnements des logiciels et capteurs, les changements de rôles

des travailleurs en particulier ceux des conducteurs d'engins miniers, les conditions de travail en salle de commande, les interactions entre les personnes, les véhicules autonomes et les véhicules conventionnelles, et les problèmes de connectivité (Institut national de recherche en informatique et en automatique, Inria, 2018).

1.4 Motivation sur une étude sur les risques pour la SST liés à ces véhicules

Les enjeux précités, et combinés à la rareté des études empiriques portant spécifiquement sur les enjeux de santé et de sécurité associés aux véhicules autonomes en mines souterraines justifie le recours à une étude exploratoire, dont la finalité est d'identifier les principaux risques, de comprendre les interactions entre facteurs techniques, humains et organisationnels, et de structurer une première démarche de prévention adaptée à ce contexte.

À la suite de ce chapitre, une revue de la littérature sur le cadre technique et réglementaire lié à ces véhicules sera présentée, suivie des problématiques et des objectifs de cette étude au deuxième chapitre. La méthodologie adoptée pour atteindre ces objectifs sera détaillée au troisième chapitre. Les résultats de notre étude seront présentés au chapitre 4. Le chapitre 5 sera consacré à la discussion de nos résultats et le chapitre 6 va conclure notre étude en émettant des recommandations pour de futures recherches.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

L'objectif de cette revue littéraire consiste à recenser, analyser et synthétiser les connaissances existantes relatives au cadre technique et réglementaire encadrant ces véhicules en milieu souterrain, et à faire ressortir les lacunes observées. Cette revue présente les risques classiques rencontrés dans une mine souterraine conventionnelle, les niveaux d'autonomie définis par la Société internationale des ingénieurs automobiles, les normes et guides qui encadrent l'utilisation des véhicules autonomes, ainsi que les méthodes de gestion des risques associées (traditionnelles et émergentes).

2.1 Environnement minier souterrain et enjeux SST

2.1.1 Contexte des mines souterraines

La réalisation des activités minières en milieu souterrain comporte de nombreuses contraintes qui influencent les conditions de travail et la planification opérationnelle. Sur le plan de la sécurité, les risques sont accrus en raison de l'environnement confiné, du risque d'effondrement et de la gestion des évacuations d'urgence. Dans le domaine de la gestion de la qualité de l'air, la ventilation est un enjeu majeur, car elle vise à maintenir, dans l'atmosphère des travaux souterrains, une composition, une température et un degré d'humidité compatibles avec la sécurité et la santé du personnel (Zoubir, 2022). D'après Zoubir (2022), la ventilation en milieu souterrain est nécessaire pour assurer le renouvellement de l'air, éviter la formation des mélanges détonants d'air et de méthane, refroidir l'atmosphère des chantiers où la température est élevée et y maintenir des conditions de travail favorables.

Par ailleurs, l'ergonomie des postes de travail en milieu souterrain est fréquemment mise à mal par l'exiguïté des espaces, contraignant les travailleurs à adopter des postures pénibles susceptibles de nuire à leur santé et à leur productivité. C'est le cas par exemple des mines souterraines en Afrique du Sud où les gisements sont horizontaux et peu épais. De plus, la forte concentration de poussières réduit considérablement la visibilité, compliquant la circulation des engins miniers ainsi que les déplacements du personnel, ce qui accroît le risque d'incidents ou d'accidents.

Sur le plan de la communication, l'échange d'informations dans cet environnement se révèle particulièrement complexe en raison de l'accès difficile et des conditions physiques du sous-sol.

Pour répondre à cette problématique, Taleb (2017) propose l'utilisation de la technologie MIMO-OFDM (Multiple-Input Multiple Output – Orthogonal Frequency Division Multiplexing), une solution sans fil à haut débit, jugée adaptée et prometteuse pour garantir des communications fiables dans les mines souterraines. Ces contraintes spécifiques aux environnements souterrains sont régulièrement à l'origine de nombreux risques.

2.1.2 Risques SST et enjeux de prévention

La notion de risque est définie de diverses manières dans la littérature. La norme internationale ISO 12100 : 2010 sur la sécurité des machines définit le risque comme étant la « combinaison de la probabilité d'un dommage et de la gravité de ce dommage » (International Organization for Standardization, 2010). Pour la norme canadienne CSA Z432 : 2004 sur la protection des machines, le risque est la « combinaison de la probabilité et de la gravité de la blessure ou de l'atteinte à la santé pouvant survenir dans une situation dangereuse » (Association Canadienne de Normalisation, 2004). En d'autres termes, le risque survient lorsqu'une personne est exposée à un danger. Le danger peut être d'origine mécanique, électrique, thermique, engendré par le bruit, les vibrations, les rayonnements, les matériaux et produits, le non-respect des principes ergonomiques, ou même engendré par la combinaison de deux ou plusieurs dangers. Plusieurs zones ou activités dans les mines souterraines sont dangereuses pour la sécurité des travailleurs notamment : se déplacer à pied ou travailler dans une voie de circulation surtout si de la machinerie y circule, travailler sur un équipement émettant des bruits impulsionnels (martelage et chocs intenses, outils pneumatiques ou à percussion), effectuer la manutention manuelle des charges, travailler dans la zone dangereuse d'un équipement fixe ou mobile (entretien, ajustement, réparation), effectuer la manipulation ou le montage des pneus et des roues des engins miniers et bien d'autres (CNESST, 2021).

Les mines souterraines comportent des risques propres à leur environnement. Mahdevvari et al. (2014) ont identifié 86 risques affectant la santé et la sécurité du personnel dans trois mines souterraines de charbon en Iran. Ces risques ont été classés en huit catégories : géomécaniques, géochimiques, électriques, mécaniques, chimiques, environnementaux, personnels, sociaux, culturels et managériaux. Pour l'évaluation de ces risques, Mahdevvari et al. (2014) proposent la méthode floue TOPSIS (Technique de Similitude de Préférence d'Ordre avec la Solution Idéale) permettant de les classer en douze groupes allant de A à L par ordre de priorité de traitement (risque le plus urgent à traiter au risque le moins urgent). Ainsi, les risques les plus importants et les plus

néfastes dans une mine souterraine de charbon sont dans le groupe A. Il s'agit de : chute de matériaux, rupture catastrophique, instabilité du front de taille et de la toiture, coup de grisou, émission de gaz, ratés d'allumage, arrêt du système de ventilation, séparation des wagons sur les pentes, asphyxie, formation inadéquate et système de gestion de site défaillant (Mahdevari et al., 2014). Par ailleurs, Ruminy et al. (2020) ont identifié sept grandes catégories de risques dans les mines souterraines, comprenant chacune des sous catégories : risques humains, risques de chute, risques liés à l'environnement, risques liés aux matières dangereuses, risques liés aux types d'intervention, risques liés au terrain, risques de blessures ou émotionnels. Ces risques sont également évalués afin de proposer des mesures de réduction adéquates. Par la suite, les auteurs ont développé et utilisé un simulateur en réalité virtuelle pour sensibiliser le personnel minier aux dangers et améliorer la gestion des risques associés.

2.2 Automatisation et engins miniers autonomes

Selon International Business Machines Corporation (IBM, 2021), « l'automatisation est l'application de la technologie, des programmes, de la robotique ou des processus pour obtenir des résultats avec un minimum d'intervention humaine ». La compétitivité d'une entreprise et de ses produits repose sur la qualité, la maîtrise des coûts et la capacité d'innovation. Cela implique une recherche constante d'amélioration de la productivité, des conditions de travail et, surtout, de la sécurité. Matthieu (2024) rappelle les objectifs de l'automatisation : éliminer les tâches répétitives, améliorer la sécurité en améliorant les conditions de travail, simplifier le travail de l'humain, accroître la productivité. L'automatisation est mise en œuvre dans divers secteurs d'activités à l'aide des technologies telles que l'IoT ou internet des objets, le RFID (Radio Frequency Identification), l'intelligence artificielle (IA), Cloud Computing, l'AR/VR (réalité augmentée/réalité virtuelle), etc. L'automatisation dans le secteur industriel a connu une croissance sans précédent, au point que des recherches se concentrent désormais sur la conception des robots capables de cohabiter avec les humains en milieu de travail. C'est dans ce contexte qu'est apparu le terme cobot, désignant ces robots collaboratifs (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, 2015). De plus, les robots et machines autonomes suscitent un intérêt croissant dans les exploitations minières, notamment pour les tâches à haut risque, l'inspection des zones dangereuses, ainsi que pour l'amélioration de la productivité et de la sécurité.

2.2.1 Définition et niveaux d'autonomie des véhicules

D'après la norme J3016 de la Society of Automotive Engineers International (SAE), un véhicule autonome est un « véhicule routier équipé d'un système de conduite autonome qui a la capacité de conduire un véhicule conformément au niveau d'automatisation de conduite 3, 4 ou 5 » (SAAQ, s. d.). Ces véhicules peuvent inclure des voitures légères, robots-taxis, bus navettes, les engins spécialisés comme les véhicules à benne basculante (LHD), les appareils de forage ou les pelleteuses utilisés dans le secteur minier (Dufour, 2017). On parle également de véhicule sans conducteur ou de véhicule intelligent.

Par ailleurs, les véhicules connectés, bien que différents, communiquent avec le conducteur, les autres véhicules (véhicule à véhicule ou « V2V ») et les infrastructures routières (véhicule à infrastructure ou « V2I ») connectées à l'aide de différentes technologies (SAAQ, s. d.). Ces échanges permettent de partager des informations importantes, telles que la vitesse, la position, les incidents de circulation, ainsi que les limites de vitesse et les hauteurs de passage. La SAE a défini six niveaux d'autonomie des véhicules, allant de la conduite totalement humaine à la conduite complètement autonome. Gronier et al. (2019) proposent un tableau pour présenter explicitement les différents niveaux d'autonomie de ces véhicules. Cela est illustré par le tableau 2.1. La norme SAE J3016 décrit le niveau d'automatisation 1 comme assistant de conduite pour les déplacements longitudinaux ou latéraux, tandis que les niveaux 2 à 5 correspondent à une automatisation de la conduite pour les mouvements longitudinaux et latéraux (Chia et al., 2022).

Tableau 2.1 Niveaux d'autonomie des véhicules adaptés de la SAE. © Gronier et al., 2019.
Reproduit avec permission.

Niveau	Nom	Définition	Humain
<i>Le conducteur surveille l'environnement de conduite</i>			
0	Aucune automatisation	La conduite est entièrement à la charge du conducteur ou de la conductrice, qui peut toutefois disposer de mécanismes d'avertissement, comme le signal sonore de franchissement de ligne, de proximité d'un obstacle sur la route, etc.	
1	Aide à la conduite	Le conducteur ou la conductrice garde en permanence la responsabilité des manoeuvres, mais délègue une partie des tâches au système, typiquement pour le contrôle longitudinal du véhicule, par exemple à travers un régulateur de vitesse adaptatif. Elle ou il doit être capable de reprendre totalement la main sur la conduite si la situation l'exige.	
2	Automatisation partielle	La responsabilité des manoeuvres est entièrement déléguée au système, mais tout s'effectue sous supervision constante du conducteur ou de la conductrice, qui peut décider de reprendre la main à tout moment, par exemple lors d'un changement de voie automatique.	
<i>Le système de conduite automatisée surveille l'environnement de conduite</i>			
3	Automatisation conditionnelle	Le conducteur ou la conductrice peut déléguer la conduite sur les deux dimensions de guidage (longitudinal et latéral) et peut abaisser son niveau de vigilance pour se consacrer de manière brève à d'autres tâches. Le système de pilotage intelligent se charge alors de positionner et de maintenir le véhicule sur sa voie tout en conservant une allure adaptée à la vitesse et aux conditions de trafic	
4	Automatisation élevée	C'est un niveau hautement automatisé dans lequel le conducteur ou la conductrice n'intervient déjà plus et peut en effet complètement détourner son attention pour faire autre chose. En revanche, ce niveau ne concerne que certains modes de conduite, et sous certaines conditions. C'est le conducteur ou la conductrice qui active et désactive le mode automatisé.	
5	Automatisation complète	C'est l'automatisation ultime : l'être humain n'intervient plus, ni dans le contrôle, ni dans la supervision de la tâche de conduite ou de navigation. Tout est sous la responsabilité et le contrôle du système. La présence même d'un être humain aux commandes n'est plus forcément nécessaire.	

2.2.2 Panorama technologique des véhicules autonomes

Les véhicules autonomes sont une forme avancée de robotique mobile reposant sur les technologies de l'industrie 4.0. Leur fonctionnement s'appuie sur un ensemble de capteurs (LiDAR, radars, caméras, ultrasons, infrarouges), de systèmes de navigation et de localisation (GPS, cartographie), et de logiciels embarqués intégrant des algorithmes d'intelligence artificielle (Ville de Montréal, 2017). Ces technologies permettent au véhicule de modéliser son environnement en 3D, de

reconnaître les objets et les infrastructures (panneaux, véhicules, obstacles, etc.) et de prendre des décisions autonomes telles que freiner, accélérer, dépasser ou changer de voie.

Chaque capteur joue un rôle spécifique :

- Le LiDAR : mesure la distance et la forme des objets avec précision ;
- Le radar : détecte les obstacles via les ondes radio, même en conditions difficiles ;
- Les caméras : assurent la reconnaissance visuelle ;
- Les ultrasons : sont utiles pour les manœuvres de proximité ;
- Les infrarouges : détectent la chaleur, notamment de nuit (Jean-Baptiste, 2025).

L'ensemble de ces données, fusionnées par les systèmes embarqués, guide le véhicule dans sa prise de décision en temps réel. Bathla et al. (2022) proposent une représentation des composants de cette architecture. Cela est illustrée par la figure 2.1.



Figure 2.1 Composants d'un véhicule autonome. © Bathla et al., 2022. Reproduit avec permission

L'un des principaux défis actuels pour les véhicules autonomes réside dans la synchronisation des données issues des capteurs (LiDAR, radar, caméras) afin d'assurer une détection fiable dans des environnements complexes (neige, obscurité, routes irrégulières, etc.). Pour y répondre, Liu et al. (2025) ont développé *Fusion-Net*, une architecture combinant les nuages de points LiDAR et les

estimations de profondeur des caméras via un transformateur sensible à la profondeur (DAT). Ce système améliore la compréhension 3D à partir d'images 2D, avec des résultats supérieurs à ceux des algorithmes de fusion existants, notamment sur les données du projet KITTI.

Selon Lakomicki et al. (2018), les systèmes de perception collectent les données de l'environnement, tandis que les systèmes de décision les exploitent pour déterminer la trajectoire du véhicule. Toutefois, des erreurs peuvent survenir :

- Le module de perception peut fournir des données erronées à cause de perturbations (poussières, éclairage, objets difficiles à détecter, capteurs mal alignés, etc.) (Robin Burgess-Limerick et al., 2025).
- Le module de décision peut aussi se tromper malgré des données fiables, notamment en cas de mauvaise anticipation du comportement, parfois imprévisible, des autres usagers.

Ces limites soulignent l'importance cruciale d'une intégration harmonieuse et robuste entre la perception et la décision pour prévenir les accidents sur la route. Lakomicki et al. (2018) ont proposé une description du système de perception et de décision des véhicules autonomes. Cela est illustré par la figure 2.2.

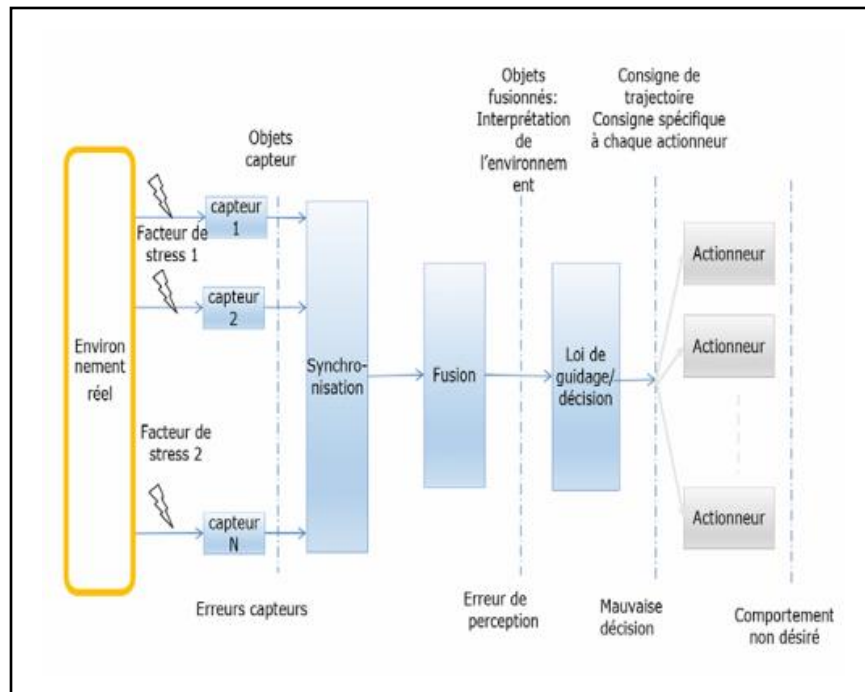


Figure 2.2 Description du système de perception et de décision du véhicule autonome. ©

Lakomicki et al., 2018. Reproduit avec permission

Les véhicules autonomes sont utilisés dans divers secteurs d'activités tels que le transport public, la construction, l'industrie minière, etc.

Depuis avril 2018, le Québec a intégré la notion de véhicule autonome dans son Code de la sécurité routière, en s'appuyant sur la définition de la norme SAE. Les véhicules de niveau 0 à 2 sont autorisés à circuler sur les voies publiques, mais leur conducteur reste entièrement responsable. En revanche, les véhicules de niveau 3 à 5 sont interdits de circulation, sauf dans le cadre de projets pilotes autorisés par le ministère des Transports et de la Mobilité durable (MTMD), d'une durée de cinq ans, prolongeable de deux ans. Durant ces tests, la responsabilité incombe aux organisations détentrices des véhicules (Ministère des Transports et de la Mobilité Durable, 2025).

Malgré cette restriction, Transports Canada a déjà autorisé la vente d'un véhicule autonome de niveau 3. Par ailleurs, des expérimentations sont en cours au Québec concernant des autobus et des minibus autonomes, en vue de leur intégration sécuritaire au réseau de transport urbain (SAAQ, s. d.-a).

Cependant, la littérature ne prend pas en compte certains scénarios critiques pouvant survenir pendant la circulation réelle des véhicules autonomes, comme :

- un dysfonctionnement de feu de signalisation (scénario 1),
- ou la présence d'un agent de circulation remplaçant temporairement les feux (scénario 2).

Ces situations soulèvent des incertitudes quant à la capacité des véhicules à réagir correctement (détection, prise de décision, sécurité). Pour y répondre, des technologies de communication entre les infrastructures et les véhicules (V2I) peuvent être utilisées, ainsi que des solutions de reconnaissance des agents humains via RFID ou gestes standardisés.

Enfin, au-delà du transport urbain, les secteurs de la construction et de la mine tirent également profit de l'autonomie des véhicules pour accroître la productivité, la sécurité et l'efficacité opérationnelle, en automatisant des tâches telles que le transport de matériaux ou les opérations d'excavation (GMG, 2023).

2.2.3 Les véhicules autonomes dans les mines

Global Mining Guidelines Group (GMG), un groupe mondial d'orientation de l'exploitation minière, propose dans le cadre de ses directives pour la mise en œuvre des systèmes autonomes

dans l'exploitation minière, six niveaux d'autonomies des véhicules inspirés du modèle de la SAE et en utilisant la terminologie standard de la norme ISO 17757 : 2019 (Organisation Internationale de Normalisation) sur les engins de terrassement autonomes et semi-autonomes. Cela est illustré par la figure 2.3.

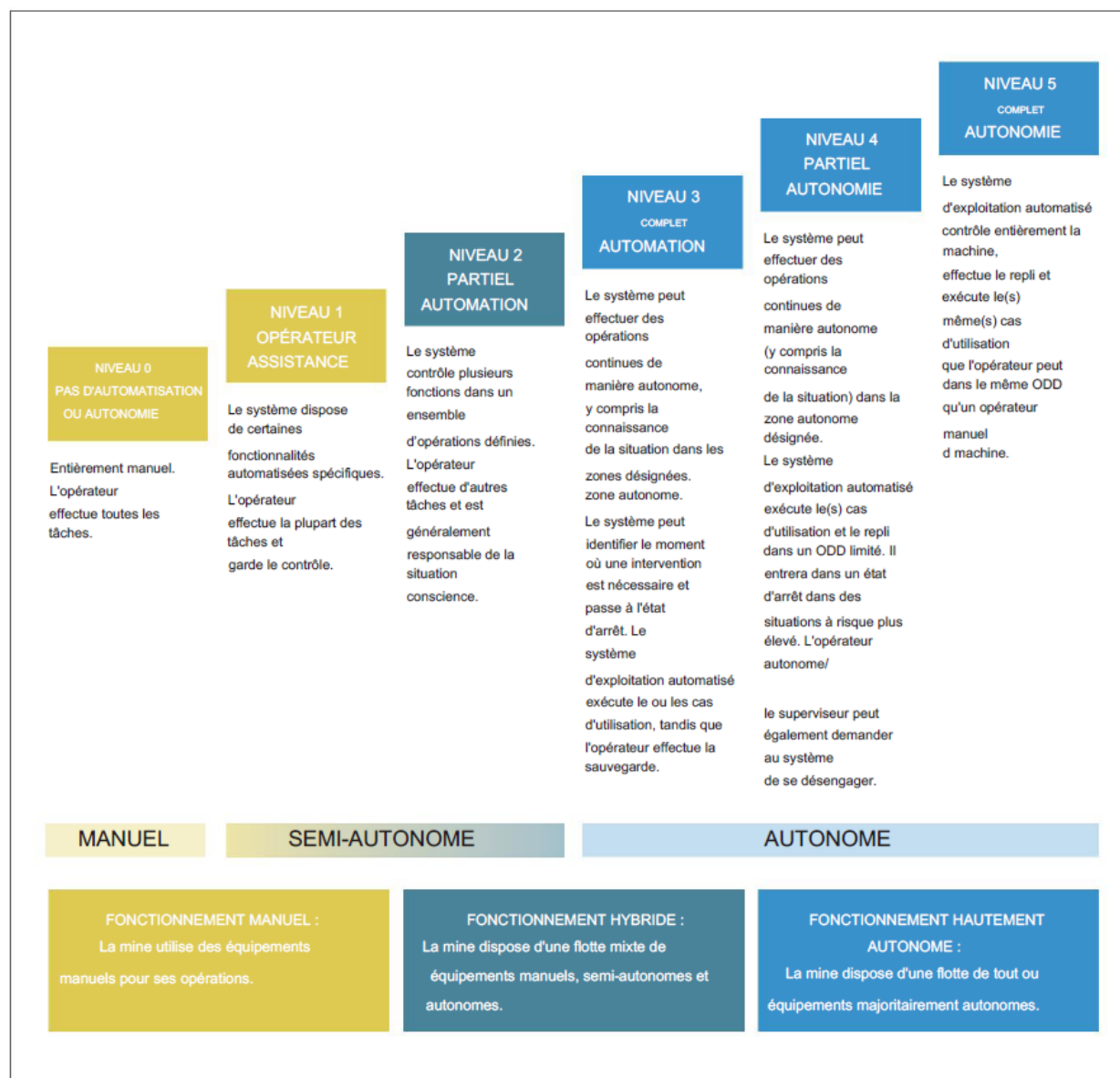


Figure 2.3 Modèle de maturité de l'automatisation minière. © GMG, 2023. Reproduit avec autorisation (traduction en français par nos soins)

Cette figure provient de la deuxième version (publiée en 2023) des directives de la GMG pour la mise en œuvre des systèmes autonomes dans une exploitation minière. Dans la première version

de ses directives (publiée en 2019), cette figure est différente. En effet, le GMG considérerait les niveaux 0 et 1 comme manuels, car une intervention humaine est toujours nécessaire. Le niveau 2 est semi-autonome et les niveaux 3 à 5 sont autonomes. Dans sa deuxième version, le GMG classe désormais le niveau 1 comme un véhicule semi-autonome, sans toutefois fournir d'explications. Selon notre analyse, cette reclassification s'explique par la présence de fonctionnalités automatisées spécifiques au système de conduite de ce niveau.

La Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ, s. d.-b) souligne qu'il ne faut pas confondre les termes « véhicules autonomes » et « véhicules automatisés », car ils ne sont pas synonymes. Elle précise qu'un véhicule automatisé peut être conduit avec ou sans intervention humaine selon certaines conditions, tandis qu'un véhicule autonome fonctionne sans surveillance ni assistance humaine. Pour Gronier et al. (2019), les véhicules autonomes ne concernent que les véhicules dont le niveau d'automatisation est le plus élevé, c'est-à-dire le niveau 5. Toutes ces affirmations comportent de nombreuses contradictions qui nécessitent des éclaircissements. Si l'on s'en tient à la définition de véhicule autonome de la SAE et au modèle de maturité de l'automatisation minière du GMG, les véhicules autonomes comprennent les véhicules dont le niveau d'automatisation est 3, 4 ou 5. Aussi, pour utiliser le terme « véhicule autonome », il faudrait préciser le niveau d'automatisation auquel il appartient. Peut-on dissocier le terme « véhicule autonome » de « véhicule automatisé » ? L'utilisation du terme « véhicule automatisé » n'est-elle pas d'ordre général ? D'après la taxonomie de la SAE et du modèle du GMG, les véhicules de niveau 1 (aide à la conduite), 2 (automatisation partielle), 3 (automatisation conditionnelle), 4 (automatisation élevée) et 5 (automatisation complète) possèdent des fonctions d'automatisation et sont considérés comme des véhicules automatisés. Un véhicule autonome est d'abord un véhicule automatisé, mais cela dépend de son niveau d'automatisation. Si le véhicule automatisé (ou semi-autonome) est de niveau 1 ou 2, alors les termes « véhicule automatisé » et « véhicule autonome » ne sont pas synonymes. En revanche, si le véhicule automatisé est de niveau 3, 4 ou 5, alors les termes « véhicule automatisé » et « véhicule autonome » sont des synonymes. Il est donc important de toujours préciser le niveau d'automatisation du véhicule afin d'éviter toute confusion.

2.2.4 Les véhicules autonomes dans les mines souterraines

Concernant les véhicules autonomes du secteur minier, il s'agit des engins de grandes dimensions (avec des roues dépassant la taille d'une personne) tels que des camions, des chargeuses, des

bulldozers, etc. Dans son rapport technique, le GMG (2023) fournit des orientations de haut niveau, structurées autour des principaux domaines de considération (analyse de rentabilité, gestion du changement, sécurité et gestion des risques, personnes, processus, technologie, etc.), destinées à diverses parties prenantes afin de les aider à avancer dans la mise en œuvre de systèmes autonomes dans l'exploitation minière. Plusieurs véhicules autonomes sont déjà en opération dans les mines à travers le monde. En 2022, on a recensé 183 installations de flottes d'équipements miniers autonomes et semi-autonomes (Robin Burgess-Limerick et al., 2025). L'Australie abritait 44 % des installations, puis le Canada avec 16 %. Toujours en 2022, on comptait 1 070 camions de transport autonomes en service dans le monde, soit une hausse de 39 % par rapport à l'année précédente, dont 706 étaient en opération en Australie. Selon FutureBridge (2022), ce nombre devrait dépasser les 1 800 d'ici la fin de l'année 2025. Au Canada, l'entreprise Suncor Energie a déjà déployé plus de 35 camions de transport autonomes à sa mine Millenium depuis 2018 (Suncor, 2024). Ce déploiement est en droite ligne avec son plan d'intégration, qui prévoit 91 camions de transport autonome actifs d'ici la fin de l'année 2025. Sur l'ensemble de ses sites d'exploitation dans le monde, l'entreprise Rio Tinto exploite plus de 26 foreuses et 220 camions autonomes (GMG, 2021). D'autres entreprises minières utilisent également des véhicules autonomes dans leurs opérations. C'est le cas notamment de l'entreprise Agnico Eagle à sa mine LZ5 au Québec, l'entreprise Glencore à sa mine Raglan et bien d'autres.

D'après les échanges avec un fabricant d'équipements d'origine (FEO) spécialisé dans les véhicules autonomes et semi-autonomes, il apparaît que ces véhicules, utilisés dans les mines souterraines, sont généralement téléopérés. En effet, chaque mine souterraine autonome dispose d'une salle de commande en surface où se trouvent des opérateurs assis sur des sièges confortables et équipés de commandes leur permettant d'opérer à distance les véhicules autonomes et semi-autonomes souterrains. Les zones de fonctionnement autonome (ZFA : zones où les véhicules sont autorisés à fonctionner en mode autonome ou semi-autonome) sont catégorisées. Nous avons des zones où un seul véhicule autonome est autorisé à circuler, des zones où seuls des véhicules autonomes de même type sont autorisés à circuler (camions de transport autonomes ou chargeuses autonomes seulement, etc.), et des zones où les véhicules autonomes de différents types sont autorisés à circuler (camions de transport autonomes et chargeuses autonomes, etc.). La catégorisation de ces zones peut varier d'une mine souterraine à l'autre. De plus, les véhicules autonomes et semi-autonomes opérant dans les mines souterraines ne sont pas automatiquement connectés entre eux.

À la suite de cette présentation sur la technologie des véhicules autonomes, il est essentiel d'examiner le cadre réglementaire et normatif qui les encadre, ainsi que les différentes méthodes de gestion des risques existantes.

2.3 Cadre de gestion des risques

2.3.1 Normes et référentiels existants

Plusieurs normes nationales et internationales sont élaborées pour gérer efficacement les risques en milieu de travail. La norme internationale ISO 31000 : 2018 fournit des principes et des lignes directrices pour le management du risque. Elle adopte une approche intégrée visant à identifier, analyser, évaluer, traiter et surveiller les risques au sein d'un organisme, tout en assurant une communication efficace à leur sujet (International Organization for Standardization, 2023b). Quant à la norme ISO 45001 : 2018, elle spécifie les exigences que doit remplir un système de management de la santé et de la sécurité au travail (International Organization for Standardization, 2024). Dans la même perspective, elle fournit un cadre aux organisations afin de mieux gérer leurs risques et d'améliorer leurs performances en matière de SST. La réglementation est plus spécifique au Canada avec un règlement sur la santé et la sécurité dans les mines de charbon. Ce règlement établit les bonnes pratiques à suivre pour assurer une gestion efficace et sécuritaire d'une mine. Au Québec, le règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) dans les mines spécifie les exigences de sécurité à respecter pour un environnement de travail sûr (Irosoft, 2024).

Dans le même sens, le code de sécurité pour les travaux de construction au Québec fixe les règles régissant le travail sur les chantiers de construction. Ce code établit des règles et mesures de sécurité concernant l'organisation du travail, les outils et équipements, les structures temporaires, la machinerie et les travaux comportant des risques particuliers (Association Paritaire pour la Santé et la sécurité du travail, secteur Affaires Municipales - APSAM, 2025). La norme ISO 12100 : 2010 sur la sécurité des machines spécifie les principes de l'appréciation et de la réduction du risque pour aider les concepteurs à atteindre cet objectif. Selon une étude de Burlet-Vienney et al. (2017) sur l'implantation du cadenassage des équipements mobiles dans le secteur municipal, cette norme concerne les équipements mobiles au même titre que les équipements fixes. La norme ISO 19296 : 2018 sur la sécurité des engins mobiles d'exploitation minière souterraine, traite des phénomènes dangereux, des situations dangereuses et des événements dangereux lorsque les engins sont utilisés

comme prévu ou dans des conditions de mauvais usage raisonnablement prévisibles par le constructeur (International Organization for Standardization, 2018).

Cependant Hongmin et al. (2024) estiment que les normes classiques de gestion des risques suscitées ne sont pas adaptées aux véhicules autonomes. Ces normes ont été élaborées pour des systèmes et équipements dépourvus de fonctions automatisées. De plus, les auteurs soulignent que le fonctionnement des véhicules autonomes repose sur des technologies complexes et évolutives, ce qui les expose à des attaques cybernétiques. Il est donc important que l'intégration des véhicules autonomes réponde à des normes de sécurité particulières qui traitent du risque technologique ou risque de sécurité (Hongmin et al., 2024). Par ailleurs, Hongmin et al. (2024) constatent que le risque de sécurité n'est pas généralement pris en compte dans la littérature au détriment du risque de sûreté. Selon Kornecki et Liu (2013), la sécurité et la sûreté sont deux dimensions complémentaires pour la gestion des risques. En effet, la sûreté concerne la protection contre les menaces intentionnelles telles que les attaques de réseau, les sabotages, susceptibles d'endommager le système de contrôle des VA et causer des accidents et des pertes de production. Quant à la sécurité, elle vise la prévention des accidents et des défaillances involontaires comme les erreurs techniques, les erreurs humaines, les pannes et autres (Piètre-Cambacédès & Bouissou, 2013). Pour Kriaa et al. (2014), la sécurité et la sûreté diffèrent par les sources de risque (accidentelle ou intentionnelle), la nature du risque, les outils et les méthodes de gestion des risques. De plus, Novak et Gerstinger (2010) soulignent que la sécurité et la sûreté doivent être garanties à chaque étape du cycle de vie du VA, depuis la spécification des exigences jusqu'à la conception, l'exploitation, la maintenance et le démantèlement. Dans cette perspective, Hongmin et al. (2024) recommandent l'utilisation de normes de sécurité adaptées pour encadrer la gestion des risques liés aux VA. La norme CEI 61508 dans ses parties 1 à 3 définit les principes de la sécurité fonctionnelle applicables aux systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité. Elle traite de la sûreté de fonctionnement de ces systèmes, y compris l'électronique numérique et les logiciels (International Electrotechnical Commission, 2010). Dans le même sens, la norme ISO 26262 sur l'évaluation de la sécurité fonctionnelle et dérivée de la CEI 61508, consiste à traiter les dangers potentiels pouvant résulter d'une défaillance ou d'un dysfonctionnement des composants de sécurité du VA (International Electrotechnical Commission, 2010). La norme ISO 26262 concerne les véhicules routiers (véhicules routiers – sécurité fonctionnelle). Par ailleurs, la norme ISO 17757 : 2019 sur la sécurité de système de machine

autonome et semi-autonome dans les opérations de terrassement et d'exploitation minière spécifie les critères de sécurité des machines et de leurs systèmes et leur infrastructure associés, y compris le matériel et les logiciels. Dans ce cadre, elle fournit des lignes directrices sur la sécurité d'utilisation dans leurs environnements fonctionnels définis pendant le cycle de vie de la machine et du système (International Organization for Standardization, 2019). La partie 1 de la norme 13849 spécifie les principes généraux de conception des systèmes de commande relatives à la sécurité des machines (International Organization for Standardization, 2023a). Au Canada, l'exploitation des véhicules autonomes et semi-autonomes en milieu souterrain est encadrée par plusieurs normes. La norme M424.0-2022 établit les exigences essentielles de sécurité et de performance applicables aux différents équipements mobiles d'exploitation minière souterraine. Elle doit être interprétée et appliquée conjointement avec les normes spécifiques relatives au freinage (CSA M424.3) et au type de groupe motopropulseur concerné (CSA M424.1, CSA M424.2 et CSA M424.4). Le paragraphe 4.6.2 (2) de cette norme précise que l'équipement actuellement utilisé sur les sites miniers demeure conforme s'il satisfait aux exigences de la norme CSA M424.0 ou de la version 2022 du code au moment de son introduction sur le site (ministère de l'Énergie, des Mines et de l'Innovation à faible émission de carbone de la Colombie-Britannique, 2024). Cette norme exige l'élaboration des procédures de santé et de sécurité avant l'utilisation d'un équipement mobile. En Colombie-Britannique, l'exploitant doit mettre à jour le programme de santé et de sécurité de la mine incluant ces équipements, et soumettre une copie à l'inspecteur en chef du ministère (ministère de l'Énergie, des Mines et de l'Innovation à faible émission de carbone de la Colombie-Britannique, 2024). Par ailleurs, la norme CSA M424.3-2022 décrit les critères de performance et d'essai minimaux pour le système de freinage de service, le système de freinage secondaire et le système de stationnement des machines minières souterraines automotrices à pneus en caoutchouc.

Toutefois, il s'avère nécessaire d'élaborer de nouvelles normes afin d'améliorer la sécurité des systèmes de détection automatique (SDA) des véhicules autonomes (National Highway Traffic Safety Administration, 2017).

Les normes susmentionnées s'appuient sur de nombreuses approches classiques de gestion des risques industriels.

2.3.2 Méthodes existantes de gestion des risques

2.3.2.1 Méthodes classiques de gestion des risques

De nombreuses approches permettent d'identifier, d'analyser, d'évaluer et de réduire les risques en milieu industriel. Dans le cadre de notre étude, l'attention est portée sur la méthode qui se rapproche le plus des pratiques appliquées aux machines industrielles.

Méthode selon l'ISO 12100 : 2010

La norme ISO 12100 : 2010 sur la sécurité des machines : principes généraux de conception, appréciation et réduction du risque constitue un document fondamental de type A dans la hiérarchie des normes de sécurité des machines (International Organization for Standardization, 2010). Elle établit les principes généraux de conception des machines afin d'assurer leur sécurité tout au long de leur cycle de vie, depuis la conception jusqu'à la mise au rebut. L'ISO 12100 est conçue comme une norme de base servant de référence à l'élaboration de normes de type B (génériques, portant sur des aspects particuliers de sécurité) et de type C (spécifiques à certaines machines, comme les véhicules autonomes et semi-autonomes). Elle intègre et remplace plusieurs normes antérieures, notamment ISO 12100-1:2003, ISO 12100-2:2003 et ISO 14121-1:2007, en les unifiant sans modifications techniques majeures (International Organization for Standardization, 2010).

Elle fournit une méthodologie structurée d'appréciation et de réduction des risques, basée sur l'expérience accumulée en matière de conception, d'utilisation et d'accidents de machines industrielles. Elle s'applique aux machines fixes (presses, robots, machines-outils, etc.), mobiles (chariots élévateurs, pelles mécaniques, équipements de levage, camions, etc.), et outils portatifs (scies à chaîne, perceuses, etc.) (Sekkay, Polytechnique Montréal 2024).

Son objectif principal est de guider les concepteurs et utilisateurs dans l'identification des phénomènes dangereux, l'estimation et l'évaluation des risques, ainsi que dans la mise en œuvre de mesures de réduction des risques selon une hiérarchie précise :

- Conception intrinsèquement sûre (éliminer les dangers à la source) ;
- Moyens de protection techniques (dispositifs de sécurité, barrières, systèmes de commande sûrs) ;
- Informations pour l'utilisation (avertissements, procédures, formation, EPI) (International Organization for Standardization, 2010).

La démarche proprement dite comprend deux grandes parties : l'appréciation du risque et sa réduction (International Organization for Standardization, 2010).

L'appréciation du risque se fait en deux sous-étapes notamment l'analyse du risque et l'évaluation du risque.

L'analyse du risque est réalisée suivant trois niveaux : la détermination des limites de la machine, l'identification des phénomènes dangereux et l'estimation du risque. Les limites de la machine sont inscrites dans le manuel d'utilisation par le fabricant. Il s'agit des limites d'utilisation (modes de fonctionnement, procédures de maintenance, etc.), limites dans l'espace (interface opérateur-machine, dimensions pour les interventions de maintenance etc.), limites dans le temps (durée de vie de la machine et/ou des composants, fréquences d'entretien recommandées, etc.) et autres limites comme les propriétés des matériaux traités (Sekkay, Polytechnique Montréal 2024). Après la détermination des limites de la machine, l'étape essentielle de toute appréciation du risque est l'identification systématique des phénomènes dangereux, situations dangereuses, et événements dangereux susceptibles de survenir au cours de toutes les phases du cycle de vie de la machine (transport, montage et installation, mise en service, utilisation, démontage, mise au service et mise au rebut). La CNESST (anciennement appelée CSST, Commission de la santé et de la sécurité du travail) et l'IRSST ont codéveloppé un outil d'estimation du risque. Les paramètres d'estimation du risque de cet outil sont la gravité du dommage (G), la fréquence et/ou la durée d'exposition au phénomène dangereux (F), la probabilité d'occurrence de l'événement dangereux (O) et la possibilité d'évitement du dommage (P). L'outil définit une échelle pour chaque paramètre. Cela est illustré par le tableau 2.2.

Tableau 2.2 Échelle de niveau des paramètres d'estimation du risque

Gravité du dommage : G	
G1 : <i>Lésion légère</i> (normalement réversible)	par ex. écorchure, lacération, bleu, blessure légère qui nécessite des premiers soins, perte de communication, etc.
G2 : <i>Lésion grave</i> (normalement irréversible, y compris le décès)	par ex. membre brisé ou arraché, blessure grave avec points de suture, décès, piratage du système de transport autonome, etc.

Tableau 2.2 Échelle de niveau des paramètres d'estimation du risque (suite et fin)

Fréquence et/ou durée d'exposition au phénomène dangereux : F	
F1 Rare à assez fréquente et/ou courte durée d'exposition	Selon le besoin d'accès à la zone dangereuse (par ex. pour des raisons de production, d'entretien ou de réparation), la nature de l'accès (par ex. l'alimentation manuelle de matières), le temps passé dans la zone dangereuse, le nombre de personnes demandant l'accès et la fréquence d'accès
F2 Fréquente à continue et/ou longue durée d'exposition	
Probabilité d'occurrence de l'événement dangereux : O	
Selon les données de fiabilité, l'historique en matière d'accidents et la comparaison des risques	
O1 Très faible	Technologie stable, éprouvée et reconnue pour les applications de sécurité
O2 Faible	événement relié à une défaillance technique de probabilité supérieure ou égale à 10-5 bris/heure (1 bris/100 000 heures) ; ou bien, événement entraîné par l'action d'une personne qualifiée, expérimentée, formée, effectuant une tâche unique, etc.
O3 Élevée	événement relié à une défaillance technique de probabilité supérieure ou égale à 10-3 bris/heure (1 bris/1 000 heures) ; ou bien, événement entraîné par l'action d'une personne sans expérience ou formation particulière.
Possibilité d'évitement du dommage : P	
P1 Possible dans certaines conditions	En fonction du mode d'exploitation de la machine (avec ou sans travailleur, par des travailleurs expérimentés), de la rapidité d'apparition de l'événement, de la conscience du risque, de la possibilité humaine d'éviter ou de limiter le risque, de l'expérience ou de la connaissance pratique du phénomène dangereux
P2 Impossible ou rarement possible	

Par la suite, l'indice du risque est obtenu en combinant les paramètres de l'estimation du risque. La figure 2.4 illustre cette combinaison.

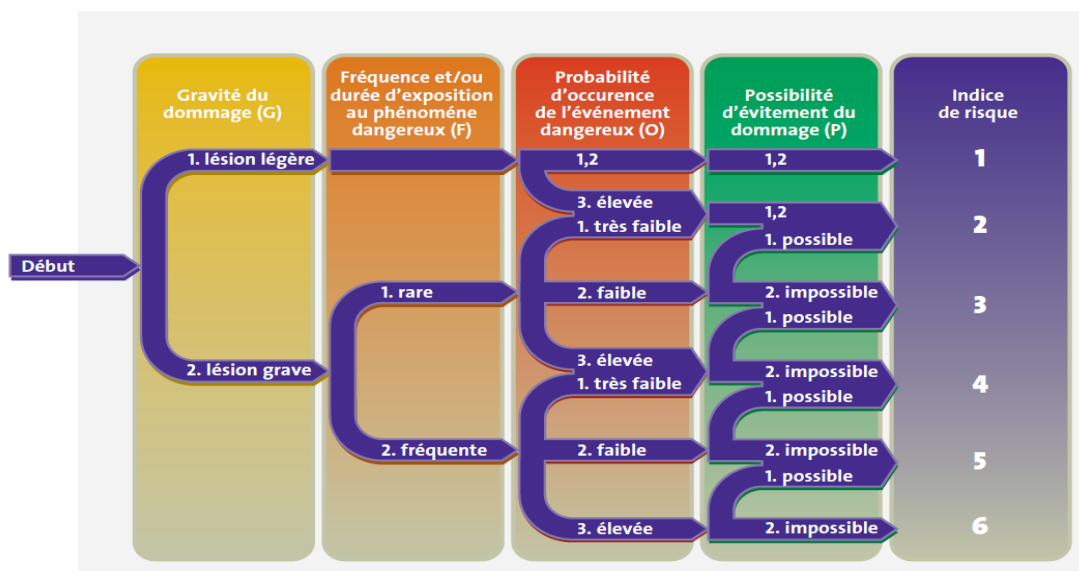


Figure 2.4 Estimation du risque par l'outil CSST-IRSST

L'évaluation des risques consiste à porter un jugement sur la valeur de l'indice de risque afin de déterminer si celui-ci est acceptable ou non. Cette appréciation repose sur l'analyse des retours d'expérience issus d'accidents de travail survenus avec des machines, des installations, des secteurs d'activités ou des environnements similaires, permettant ainsi d'appuyer la décision sur des données concrètes et comparables.

L'étape de réduction du risque vise à éliminer les phénomènes dangereux dans la mesure du possible, voire réduire les risques au plus bas niveau possible. Les mesures de prévention sont choisies dans le respect de la hiérarchie des moyens de réduction du risque (CNESST, 2021). La hiérarchie est définie selon les étapes suivantes :

- l'élimination du phénomène dangereux à la source ;
- le remplacement de matériaux, de processus ou d'équipements ;
- les contrôles techniques (exemple : protecteur sur une machine, dispositif de protection);
- Les mesures administratives (exemple : procédures de travail sécuritaire, formation du travailleur) ;

- Les équipements de protection individuelle (exemple : gants, lunettes, mesures pour assurer l'utilisation et l'entretien adéquats).

2.3.2.2 Limites des approches traditionnelles dans les mines souterraines mobiles autonomes

La complexité des véhicules autonomes génère une demande accrue d'exigences critiques pour la sécurité. De plus, la gestion des risques associés à ces véhicules suscite une attention grandissante (Chia et al., 2022). Dans leur étude portant sur les approches d'évaluation des risques appliquées à la conduite autonome, Chia et al. (2022) soulignent que les méthodes traditionnelles de gestion des risques pourraient s'avérer inefficaces pour répondre aux exigences de sécurité des véhicules autonomes. En effet, ces méthodes ont été développées à un moment où les systèmes étaient plus simples, moins interconnectés et majoritairement électromécaniques. Elles mettaient plus d'accent sur les défaillances techniques au détriment des facteurs humains (cognitifs, physiques et psychosociaux) (Robin Burgess-Limerick et al., 2025). Selon Dekker et al. (2011), elles ne sont pas adaptées pour comprendre les interactions complexes, ainsi que les risques émergents liés à l'exploitation des véhicules autonomes. De plus, elles ne permettent pas non plus de prendre en compte les dysfonctionnements pouvant survenir entre les logiciels, le matériel et les opérateurs humains dans des systèmes sociotechniques complexes et fortement interconnectés, où les accidents résultent davantage de variations de performance que de défaillances isolées de composants.

Cette complexité des véhicules autonomes peut donc entraîner des situations dangereuses, même s'il n'y a aucune défaillance technique dans les composants du système. Cela signifie que les méthodes classiques d'analyse des risques, qui se concentrent uniquement sur les pannes techniques comme les méthodes AMDEC, HAZOP (étude de dangers et d'opérabilité), ISO 12100 et autres, ne suffisent pas toujours à bien comprendre les dangers liés à l'ajout de fonctions autonomes dans un système ou un véhicule. Hassall et al. (2022) l'illustrent en explorant les avantages et les limites de la méthode AMDEC dans le contexte de l'automatisation minière. Dans ce sens, les auteurs suggèrent de combiner la méthode avec d'autres approches telles que l'analyse des stratégies pour l'amélioration de la résilience et/ou l'analyse des processus théoriques des systèmes, afin de mieux comprendre et évaluer les risques complexes liés aux VA.

De nouvelles approches de gestion des risques sont donc nécessaires pour gérer efficacement les risques associés aux véhicules autonomes et prévenir les nouveaux événements dangereux en cas de nouvelles mises à niveau (Chia et al., 2022). Selon les auteurs, ces nouvelles méthodes devraient prendre en compte le risque d'événements dangereux pouvant provenir non seulement des véhicules autonomes et de leurs systèmes, mais aussi des travailleurs et des installations (aménagement de la mine souterraine).

2.3.2.3 Méthodes émergentes de gestion des risques liées aux véhicules autonomes en milieu souterrain

La gestion des risques associés aux véhicules autonomes en milieu souterrain couvre quatre phases clés : la conception, l'intégration au sein de la mine, l'exploitation (utilisation et maintenance) ainsi que la mise hors service ou recyclage. Dans le cadre de ce mémoire, l'attention est portée sur les approches récentes de gestion des risques appliquées aux phases d'intégration et d'exploitation des véhicules autonomes.

Méthode STPA

Selon Burgess-Limerick et al. (2025), la méthode STPA (System-Theoretic Process Analysis, ou Analyse des Processus Théoriques des Systèmes) est particulièrement adaptée à l'analyse des risques associés aux véhicules autonomes (VA). Issue du cadre STAMP (System-Theoretic Accident Model and Processes), élaboré par Nancy Leveson au MIT dans les années 2000, elle repose sur la théorie des systèmes et adopte une approche proactive d'identification des situations dangereuses dès la conception (Thibault et al., 2022).

Contrairement aux méthodes traditionnelles axées sur la prévention des défaillances physiques, la STPA considère la sécurité comme un problème de contrôle. Les accidents résultent ainsi non seulement de pannes matérielles, mais aussi de mauvaises interactions entre les composants logiciels, matériels, humains et organisationnels. L'analyse intègre également les dimensions organisationnelles et contextuelles dans lesquelles évolue le système automatisé (Burgess-Limerick et al., 2025).

Selon Leveson (2012), la STPA vise à inclure dans l'analyse non seulement les défaillances mécaniques, mais aussi les erreurs de conception, les défaillances logicielles, les erreurs cognitives humaines et les facteurs organisationnels contribuant aux accidents. L'objectif est de comprendre

l'ensemble du processus ayant mené à une perte de contrôle plutôt que de se limiter aux composants électromécaniques. Comme la méthode HAZOP, la STPA s'appuie sur un modèle du système, mais elle se distingue en utilisant un diagramme de contrôle fonctionnel, centré sur les flux d'information et de commande plutôt que sur les composants physiques.

La méthode comprend deux grandes étapes (Leveson, 2012) :

- Identifier les actions de contrôle inadéquates susceptibles de conduire à un état dangereux (par exemple : commande non émise, commande inappropriée ou délivrée au mauvais moment, ou commande maintenue trop longtemps).
- Analyser les causes possibles de ces actions et définir des mécanismes de prévention ou des mesures d'atténuation. Cette étape inclut la vérification de la performance des contrôles existants, la gestion des changements, les audits de performance et l'analyse systémique des incidents.

La STPA peut être utilisée à toute étape du cycle de vie d'un système : en conception (intégration de la sécurité), en exploitation (surveillance et amélioration) ou lors de modifications (mise à jour des contraintes de sécurité).

D'après Thibault et al. (2022), la STPA se distingue des approches classiques comme l'AMDEC ou la HAZOP par le changement de paradigme qu'elle propose. Elle ne cherche pas à quantifier le risque selon une combinaison de probabilité et de gravité, mais à déterminer si le système reste dans un état acceptable au regard des contraintes de sécurité. Pour illustrer, Thibault et al. (2022) utilisent l'exemple d'un sentier longeant une falaise :

- Dans une approche traditionnelle, le risque de chute est identifié, évalué (probabilité $\times$ gravité) et maîtrisé par des mesures de protection.
- Dans l'approche STPA, les pertes inacceptables (mort, blessure, dommages) sont d'abord définies, puis les situations dangereuses susceptibles d'y mener sont identifiées, modélisées et éliminées par la conception.

Ainsi, la STPA remplace la notion de risque quantifié par celle d'acceptabilité : le système est soit conforme, soit non conforme aux exigences de sécurité.

Dans leur étude portant sur l'évaluation de la méthode STPA et les premiers retours d'expérience issus de cas d'usage, Thibault et al. (2022) observent que la mise en œuvre de la STPA ne nécessite

pas de compétences techniques ou d'expérience spécifique. Toutefois, cela ne signifie pas qu'elle soit facile à appliquer. La méthode demeure relativement peu formalisée pour un usage industriel, ce qui implique une phase préalable d'appropriation importante. Les auteurs reconnaissent que l'approche STPA permet de combler l'absence des méthodes de gestion des situations fonctionnelles dangereuses (*dangerous successes*), ce qui est très intéressant pour les systèmes complexes et distribués. Cependant, dans sa forme actuelle, la méthode ne peut pas se substituer à une démarche complète d'évaluation des risques, puisqu'elle ne propose, par nature, aucune méthode d'estimation ou de quantification du risque. L'approche STPA ne fait pas d'évaluation des risques, elle se limite à l'analyse des potentielles situations dangereuses (dans le cas des approches standardisées, on parlerait de l'analyse des risques) (Thibault et al., 2022). De plus, elle est fondamentalement qualitative : elle ne propose ni hiérarchisation, ni quantification des dangers. Aussi, l'application de cette méthode sur des problèmes techniques de bas niveau soulève toujours des interrogations (Thibault et al., 2022). Sa mise œuvre est complexe et l'utilisation d'un diagramme de contrôle fonctionnel ne facilite pas la compréhension. Or une méthode d'évaluation des risques devrait être compréhensible et facilement applicable par tous. Toutefois, d'autres approches de gestion de risques ont également été développées pour gérer les risques complexes liés aux véhicules autonomes.

Méthode GMG

Dans le cadre de sa deuxième version sur les directives de mise en œuvre des systèmes autonomes dans une exploitation minière et particulièrement souterraine, le GMG propose une approche de gestion des risques selon les étapes suivantes :

Étape 1 : Identification des risques

Selon le GMG (2023), cette première partie consiste à ressortir comment l'utilisation des véhicules autonomes modifie les systèmes de sécurité établis et identifier les risques et dangers liés à ces changements. La réussite de cette étape nécessite de prendre en considération les opérateurs autonomes, les personnes, les équipements, l'environnement et la technologie. Il propose l'utilisation des outils d'identification des risques tels que l'HAZOP (étude de dangers et de l'opérabilité) ou le CHAZOP (étude des dangers et de l'opérabilité de contrôle), l'AMDEC, l'analyse des couches de protection (LOPA) ou l'analyse du nœud papillon, etc.

Étape 2 : Analyse des risques

Rendu à cette étape, le GMG (2023) recommande aux exploitants miniers de déterminer la nature des dangers ainsi que le niveau de risque, en tenant compte de plusieurs éléments : la probabilité de survenue d'un incident, la gravité potentielle des blessures ou des dommages, ainsi que la capacité à détecter un incident. Les personnes chargées d'évaluer ces risques doivent disposer des informations, des compétences, des connaissances et des expériences nécessaires dans les domaines suivants (GMG, 2023) :

- Environnement opérationnel (par exemple, échelle, complexité, environnement physique des activités minières).
- Processus opérationnels (par exemple, systèmes de maintenance, pratiques de travail, interaction, séparation).
- Risques liés à la maintenance.
- Systèmes autonomes (par exemple, fonctionnalité, exigences de sécurité fonctionnelle, caractéristiques de sécurité).
- Plan de continuité des activités du site.
- Lignes directrices en matière de gestion des risques à l'échelle de l'entreprise.

Étape 3 : Contrôles pour la gestion des risques et des dangers

À la suite de l'identification et l'analyse des risques santé et sécurité, il faut mettre en place des contrôles appropriés pour prévenir et/ou réduire ces risques et minimiser leurs conséquences potentielles (GMG, 2023). Ces contrôles doivent être hiérarchisés en allant des plus efficaces (élimination) au moins efficaces (contrôles administratifs).

Étape 4 : Suivi et examen

À cette étape, le GMG (2023) recommande de mettre en place un programme de surveillance et d'examen intégrant des audits de contrôle, des vérifications et des validations. Dans le cadre de ce processus, il faut définir clairement et attribuer les responsabilités et les obligations au personnel. Par ailleurs, la surveillance et les examens doivent tenir compte de la manière d'équilibrer les informations numériques (données sur l'état de la machine, indicateurs de performance clés) et les observations physiques (conditions environnementales, observation de la santé de la machine

pendant la maintenance). Ils doivent également s'assurer que le système autonome et les systèmes de soutien sont mis en œuvre comme prévu (GMG, 2023).

Cette approche de gestion des risques proposée par le GMG est intéressante en ce qu'elle définit des niveaux de contrôle des risques. Elle est compréhensible et facile à appliquer. De plus, sa démarche se rapproche de celle de la norme ISO 12100 : 2010 relatives à la sécurité des machines. En revanche, l'approche est générale et n'insiste pas sur les points à traiter à chaque étape. De plus, la méthode ne consacre pas une attention particulière aux risques potentiels liés à la maintenance.

Méthode selon l'ISO 17757 : 2019

L'ISO 17757 : 2019 est une norme internationale de type C tel que mentionné dans l'ISO 12100. Elle concerne en particulier les groupes de parties prenantes suivants représentant les acteurs du marché en ce qui concerne la sécurité des machines : les fabricants de machines (petites, moyennes et grandes entreprises) et les organismes de santé et de sécurité (organismes de prévention des risques professionnels, autorités réglementaires, etc.) (International Organization for Standardization, 2019). Toutefois, d'autres parties prenantes peuvent être concernées notamment les utilisateurs de machines/employeurs, les utilisateurs de machines/salariés (par ex. : syndicats de salariés, organisations représentant des personnes ayant des besoins particuliers, etc.), les prestataires de services (par exemple pour la maintenance), etc. Les informations concernant les pratiques d'exploitation minière présentées dans cette norme proviennent des travaux du Global Mining Guidelines Group (GMG) ainsi que du Western Australia Mobile Autonomous Machine Systems Working Group.

L'objectif de cette norme est de fournir les exigences de sécurité relatives aux machines autonomes et semi-autonomes (ASAM) utilisées dans les opérations de terrassement et d'exploitation minière, et à leurs systèmes de machine autonome et semi-autonome (ASAMS). Elle définit les exigences de sécurité liées aux systèmes de commande, de détection, de navigation, de communication et de surveillance. Elle couvre également les aspects matériels, logiciels et d'infrastructure associés (International Organization for Standardization, 2019).

La norme ISO 17757 : 2019 présente des exigences clés essentielles pour une exploitation sûre des véhicules autonomes :

- L'application des principes d'appréciation et de réduction des risques (définis par l'ISO 12100) ;

- La mise en œuvre des systèmes d'arrêt complets et à distance pour les véhicules autonomes ;
- Les dispositifs de détection et de navigation fiables pour éviter les collisions ;
- Communication sécurisée et cybersécurité intégrée ;
- Surveillance centralisée via un poste de contrôle ;
- Formation, documentation et procédures de mise en service obligatoires.

La mise en œuvre efficace de la norme ISO 17757 : 2019 dans une mine souterraine repose sur une approche systématique de la gestion des risques. Voici les principales recommandations :

- **Gouvernance et management du risque** : créer un comité de gouvernance pour la sécurité des systèmes de autonomes, mettre à jour régulièrement les analyses de risques documentés, intégrer les exigences ISO dans les contrats fournisseurs et la politique SST;
- **Sécurité opérationnelle** : définir des zones autonomes avec contrôles d'accès, limiter la coactivité homme-véhicule autonome et instaurer des protocoles d'arrêt d'urgence, et garantir un état sûr en cas de panne ou de perte de communication ;
- **Formation et communication** : former les opérateurs et superviseurs aux différents modes de fonctionnement des véhicules (manuel, autonome, etc.), utiliser une signalisation visuelle et sonore normalisée et promouvoir la culture de sécurité autour des systèmes autonomes ;
- **Aspects techniques spécifiques au souterrain** : assurer la redondance des communications et du positionnement, maintenir la précision de la cartographie numérique et vérifier la précision des capteurs, adapter les systèmes d'éclairage, de freinage et de direction aux conditions souterraines.;
- **Suivi et amélioration continue** : mettre en place une surveillance permanente, documenter les incidents pour capitaliser l'expérience et vérifier périodiquement la conformité et la performance des systèmes (International Organization for Standardization, 2019)

La norme ISO 17757 : 2019 présente plusieurs atouts majeurs. Elle adopte une approche systémique de la sécurité, intègre la cybersécurité, favorise la cohérence avec d'autres normes internationales, et insiste sur la formation, la documentation et la gestion du risque tout au long du cycle de vie des véhicules autonomes. Cependant, elle montre certaines limites. En effet, son

contenu reste générique et surtout adapté aux opérations de surface, avec peu d'indications pratiques pour les mines souterraines (ce qui nécessite des guides complémentaires comme ceux du GMG). Elle manque de critères quantitatifs précis, accorde une place limitée au facteur humain (acceptabilité sociale des systèmes autonomes, ergonomie cognitive, fatigue, etc.), et peut s'avérer complexe à appliquer pour les petites entreprises ou dans des environnements technologiques en évolution rapide.

À l'issue de cette revue de la littérature, il est nécessaire de dégager les limites des travaux scientifiques portant sur la problématique de ce projet.

2.4 Synthèse et lacunes identifiées dans la littérature

L'analyse des documents consultés dans le cadre de cette revue nous a permis de mettre en évidence des aspects clés à prendre en compte dans l'introduction sécuritaire des véhicules autonomes dans une mine souterraine. Certains travaux (comme ceux de Burgess-Limerick et ses collègues, Horberry et ses collègues, Hassal et ses collègues, etc.) mettent l'accent sur les facteurs humains, notamment la participation active des opérateurs, la communication continue entre l'exploitant minier et le fabricant, ainsi que l'implication de toutes les parties prenantes tout au long du processus. D'autres (comme ceux du GMG, du Western Australia Mobile Autonomous Machine Systems Working Group, la ligne directrice de la Colombie-Britannique sur l'exploitation minière sûre, etc.) s'intéressent plutôt aux aspects techniques, comme les tests et vérifications de l'infrastructure autonome et des équipements de soutien.

Par ailleurs, cette revue a permis d'explorer le panorama technologique et le cadre normatif qui encadrent l'exploitation de ces véhicules en milieu souterrain.

Les méthodes classiques de gestion des risques étant souvent jugées inadéquates aux risques complexes liés à ces véhicules, de nombreuses approches évolutives ont été proposées à l'instar de :

- la méthode STPA qui consiste à identifier les scénarios ou les chemins d'accès menant aux situations dangereuses préalablement repérées lors d'une analyse des dangers classiques et ;
- la méthode développée par le GMG qui définit les différents niveaux de contrôle des risques allant du plus efficace (élimination) au moins efficace (contrôles administratifs) (Robin Burgess-Limerick et al., 2025; GMG, 2023) et ;

- la méthode selon l'ISO 17757 : 2019 qui fournit les exigences clés pour une exploitation durable des véhicules autonomes et les recommandations pour une mise en œuvre efficace de la norme en contexte minier.

En complément des lacunes précédemment identifiées, cette revue de littérature a permis de mettre en évidence plusieurs zones d'ombre importantes concernant l'intégration des véhicules autonomes en contexte minier souterrain. Malgré l'intérêt croissant de la recherche et de l'industrie pour l'automatisation des opérations minières, trois principales lacunes ont été observées.

Les études existantes (par exemple : les directives du GMG sur la mise œuvre des systèmes autonomes dans l'exploitation minière, les travaux de Lakomicki et ses collègues sur l'encadrement de la fiabilité du véhicule autonome pour guider les tests de validation, etc.) se concentrent majoritairement sur les aspects technologiques (navigation, capteurs, efficacité opérationnelle) ou sur les gains de productivité liés à l'automatisation. Cependant, très peu de travaux abordent de manière globale et intégrée les impacts techniques, humains, organisationnels et en santé-sécurité de l'introduction des véhicules autonomes dans les environnements souterrains. Les risques émergents (par exemple : perte de communication, défaillance de capteurs, cybersécurité, erreurs de mode), les bénéfices concrets pour la sécurité et l'efficacité, ainsi que les défis de mise en œuvre (interopérabilité, acceptation humaine, maintenance spécialisée) demeurent partiellement documentés. Cette lacune montre qu'il existe un déséquilibre entre les études qui se concentrent surtout sur la technologie et celles qui abordent la gestion globale des risques. Or, cette approche intégrée est essentielle pour assurer une utilisation sécuritaire et durable des véhicules autonomes.

Par ailleurs, la littérature scientifique propose plusieurs cadres normatifs ou théoriques (tels que ISO 12100, ISO 17757, ou les lignes directrices du GMG), mais aucune étude n'a encore documenté une démarche opérationnelle complète d'intégration sécuritaire des véhicules autonomes en contexte souterrain réel. Les publications existantes s'arrêtent souvent à des principes généraux de gestion du changement, sans détailler les étapes pratiques de planification, d'essai, de validation, de formation et de suivi post-déploiement. Il en résulte un manque de références applicables pour les exploitants miniers souhaitant mettre en œuvre ces technologies tout en respectant les exigences réglementaires et les bonnes pratiques en santé et sécurité du travail.

La troisième lacune de notre revue de la littérature réside dans l'absence d'une approche structurée d'évaluation des risques pour les véhicules autonomes en milieu souterrain. Les méthodes classiques (telles que l'AMDEC, l'ISO 12100, etc.) s'avèrent partiellement adaptées, car elles ne prennent pas pleinement en compte :

- les caractéristiques dynamiques des systèmes autonomes (apprentissage automatique, perception, décision),
- les interactions complexes entre l'humain, la machine et l'environnement souterrain,
- les nouveaux paramètres tels que la détectabilité, la fiabilité logicielle, ou la cybersécurité.

Ainsi, il apparaît nécessaire de développer une approche intégrée combinant les principes des méthodes classiques à celles des méthodes émergentes de gestion des risques afin d'assurer une gestion adaptée et durable de ces véhicules en milieu minier souterrain.

Ces constats justifient pleinement la pertinence du présent mémoire, qui s'inscrit dans une démarche exploratoire et préliminaire de prévention des risques santé et sécurité liés à l'utilisation de ces véhicules dans les mines souterraines.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre repose essentiellement sur la méthodologie adoptée pour élaborer d'une part, une démarche d'intégration sécuritaire des véhicules autonomes en milieu souterrain et, d'autre part, une méthode de gestion des risques adaptée à ce contexte particulier. Nous aborderons tout d'abord les questions de recherche, les objectifs général et spécifiques sur lesquelles cette étude a été basée.

3.1 Objectif général

La présente étude a pour objectif principal de réaliser une analyse exploratoire des risques liés à l'utilisation des véhicules autonomes dans les mines souterraines et de proposer une démarche de prévention préliminaire, fondée sur les connaissances scientifiques et normatives existantes. Le but étant de proposer une démarche pratique et sécuritaire lors de l'intégration de ces véhicules en milieu souterrain, et un outil d'évaluation des risques liés à leur exploitation.

3.2 Objectifs spécifiques

L'objectif général se décline en trois (03) objectifs spécifiques :

- Dresser un état des connaissances sur les bénéfices, les défis et les risques associés à l'introduction des véhicules autonomes dans les mines souterraines ;
- Proposer une démarche conceptuelle pour l'intégration sécuritaire des véhicules autonomes dans une mine souterraine ;
- Proposer une méthodologie conceptuelle d'évaluation des risques adaptée à ces véhicules.

3.3 Questions de recherche

- Quels sont les risques émergents SST liés à l'exploitation des véhicules autonomes en milieu souterrain ?
- Quels sont les avantages et les défis associés à leur introduction dans les opérations minières souterraines ?
- Quelle démarche d'intégration permet d'assurer une mise en œuvre sécuritaire de ces technologies ?
- Quelle méthode d'évaluation des risques est la mieux adaptée à ces systèmes complexes ?

- Comment introduire et utiliser de façon sécuritaire des véhicules autonomes dans une mine souterraine ?

3.4 Méthodologie de l'étude

La méthodologie retenue repose principalement sur une analyse documentaire et normative approfondie. Ce choix méthodologique correspond à une approche exploratoire, particulièrement adaptée à un domaine en émergence où les données de terrain sont limitées et où les cadres de référence sont encore en cours de structuration. La méthodologie adoptée pour cette étude est décrite à la figure 3.1.

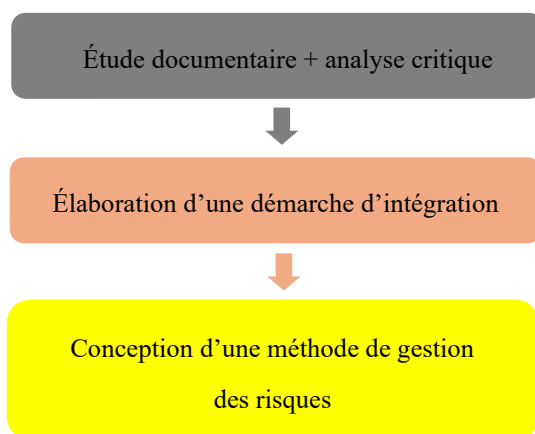


Figure 3.1 Méthodologie adoptée pour la réalisation de l'étude

3.4.1 Revue documentaire

Notre stratégie a consisté en une recherche documentaire approfondie, enrichie par une analyse critique des travaux scientifiques et techniques disponibles. Elle a porté sur plusieurs dimensions : les bénéfices et les défis associés à l'autonomie des véhicules en contexte souterrain, l'identification des risques émergents (technologiques, humains et organisationnels) liés à ces équipements, ainsi que les retours d'expérience issus des cas documentés d'implantation.

Ce choix méthodologique se justifie par sa capacité à mobiliser un éventail de données existantes, fiables et variées, permettant d'éclairer notre problématique de recherche. En outre, cette approche facilite la mise en perspective des tendances globales en SST dans ce secteur d'activité, la comparaison entre différents contextes d'application et l'extraction des enseignements pertinents pour le cas particulier des mines souterraines.

3.4.1.1 Collecte des données

Dans le cadre de l'étude documentaire, nous avons consulté des bases de données scientifiques, notamment Elsevier, ScienceDirect, Google Scholar, ResearchGate, Bibliothèque Polytechnique Montréal, ainsi que les moteurs de recherche sur Internet. La stratégie de recherche par mots-clés associait, en français et en anglais, les concepts suivants : « accidents de travail » et « mine souterraine », ou « véhicule autonome » et « mine souterraine », ou « automatisation » et « exploitation minière », ou « santé sécurité » et « mine autonome ». Vingt-deux documents pertinents (un rapport technique, deux codes pratiques, 9 articles, 3 mémoires, 7 normes et règlements) ont été retenus et analysés. Nous avons préalablement recherché des informations sur le taux d'accidents répertoriés dans les mines souterraines conventionnelles avant l'introduction des véhicules autonomes. Par ailleurs, nous avons trouvé quelques articles dont l'objectif général traitait des risques émergents associés à l'exploitation des véhicules autonomes dans les mines souterraines. Nous avons également consulté les travaux du GMG, notamment ses lignes directrices et ses livres blancs, sur la mise en œuvre des systèmes autonomes dans l'industrie minière. L'Australie étant très avancée en matière de réglementation sur les véhicules autonomes opérant dans les mines, nous avons consulté son code pratique sur l'exploitation sûre dans une mine souterraine mobile autonome. Nous avons également consulté la ligne directrice sur un mobile sûr dans l'exploitation minière autonome, émise par la Colombie-Britannique. La consultation de plusieurs normes était nécessaire, notamment la norme ISO 17757 : 2019 portant sur les engins de terrassement et l'exploitation minière – sécurité du système de machine autonome et semi-autonome, la norme ISO 12100 : 2010 sur la sécurité des machines, etc. La démarche d'analyse de ces documents sera présentée au point suivant.

3.4.1.2 Analyse des données

L'analyse des documents identifiés dans le cadre de cette recherche documentaire s'est faite à l'aide du logiciel Microsoft Excel©. En effet, nous avons élaboré plusieurs tableaux afin de répondre à chaque objectif de notre méthodologie.

Le premier tableau élaboré sur Excel a permis de compiler les informations sur les bénéfices et défis liés à l'intégration des véhicules autonomes dans les mines souterraines. Nous avons traité plusieurs aspects essentiels notamment la sécurité et l'environnement, les coûts liés à l'intégration,

l'efficacité et la production, la complexité technique ou les difficultés technologiques et l'acceptabilité de ces véhicules par le personnel minier (ressources humaines).

Nous avons également exploité des articles scientifiques pour rapporter des cas concrets d'implantation dans la littérature. Le but de cette analyse a été de mieux comprendre l'état actuel des connaissances et de comparer les pratiques en matière d'autonomie en milieu souterrain, tout en mettant en exergue les zones d'opportunité et les défis à relever pour une intégration sécuritaire.

Par ailleurs, nous avons aussi réalisé une catégorisation des risques émergents liés à l'utilisation de ces véhicules. Cette étape consistait à identifier, classer et analyser les nouveaux enjeux de santé et de sécurité au travail qui sont identifiés dans la littérature. Le type d'informations recueillies et structurées se présente comme suit :

- *Catégorie de risque* : distinction entre risques physiques, technologiques, psychosociaux et cognitifs ;
- *Nature des dangers associés* : description des situations dangereuses ou états indésirables propres à chaque catégorie ;
- *Causes potentielles* : identification des facteurs techniques, humains ou organisationnels pouvant conduire à un danger ;
- *Conséquences possibles* : impacts sur la sécurité et la santé des travailleurs, sur l'environnement de travail et sur l'organisation ;
- *Sources documentaires* : rapports d'accidents, articles scientifiques, lignes directrices, livres blancs, retours d'expériences issus des cas d'implantation.

Cette catégorisation constitue une étape importante pour mettre en lumière les angles morts de la littérature actuelle, tout en servant de base à la proposition d'une démarche d'intégration et d'une méthode de gestion des véhicules autonomes adaptée aux réalités de l'exploitation minière souterraine.

3.4.2 Méthodologie d'une démarche d'intégration sécuritaire des véhicules autonomes dans une mine souterraine

Notre démarche d'intégration préliminaire s'appuie sur deux piliers complémentaires issus de la littérature :

- Le GMG (Global Mining Guidelines Group) : fournit des orientations de haut niveau pour l'intégration progressive des véhicules autonomes, couvrant les aspects techniques, organisationnels et de gestion du changement.
- Les travaux de Burgess-Limerick et al. : apportent une analyse approfondie des facteurs humains, en insistant sur l'ergonomie, la charge cognitive, la confiance dans l'autonomie, la gestion des données vidéo/audio et les réactions comportementales des opérateurs en salle de contrôle.

3.4.2.1 Méthode d'analyse croisée

L'analyse a consisté à identifier les recommandations clés de chacun des deux référentiels. Le GMG s'intéresse à la planification de la mise en service, aux zones autonomes, aux responsabilités du personnel, ainsi qu'aux procédures de maintenance et de sécurité. Quant à Burgess-Limerick, il s'intéresse à la surveillance des opérateurs, à la gestion de la fatigue et des micro-sommeils, au feedback ergonomique des interfaces de travail, au rôle de la confiance à l'autonomie et de la vigilance humaine. Par la suite, nous avons identifié les points de convergence et de divergence des deux approches. En effet, les deux approches s'accordent sur l'importance de la gestion du changement, de la formation et de la communication claire des rôles. En revanche au niveau des points de divergence, le GMG insiste surtout sur la structure organisationnelle, alors que Burgess-Limerick met l'accent sur les limites humaines et la nécessité de concevoir des interfaces de travail adaptées aux opérateurs.

3.4.2.2 Construction de la démarche d'intégration

L'analyse croisée de ces deux approches a permis de faire ressortir les éléments suivants :

- Les étapes du GMG (planification, mise en service, exploitation, gestion des données, amélioration continue) ont été retenues et seront intégrées dans notre démarche d'intégration globale ;
- Les apports de Burgess-Limerick ont été intégrés de manière transversale à chaque étape du GMG. S'agissant de la planification, il serait important de prendre en compte la charge cognitive dans la conception des salles de contrôle. Pour la mise en service, l'intégration des retours d'ergonomie et de l'évaluation des opérateurs permettrait d'améliorer le système. Le suivi de la fatigue et de la vigilance, fondé sur l'analyse des données (images

et vidéos), serait crucial pour l'étape d'exploitation. Par ailleurs, la valorisation des retours d'expérience des opérateurs, en parallèle des indicateurs techniques, permettrait un processus d'amélioration continue plus efficace.

Notre analyse croisée des recommandations du GMG et de Burgess-Limerick est illustrée par le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Analyse croisée des recommandations du GMG et de Burgess-Limerick

Thèmes clés	Apports du GMG (organisationnel et technique)	Apports de Burgess-Limerick (facteurs humains et ergonomiques)	Analyse croisée
Planification et gestion du changement	Nécessité d'un plan structuré de mise en œuvre (calendrier, responsabilités, test, zones autonomes)	Importance d'impliquer les opérateurs dès la planification pour favoriser l'acceptabilité et réduire la résistance au changement	Définir un plan de mise en œuvre intégrant la participation active des opérateurs et un volet sur la confiance dans l'autonomie (sans toutefois prôner une confiance excessive à l'autonomie)
Mise en service	Processus de validation progressive (essais pilotes, critères d'acceptation, conformité réglementaire)	Suivi de la charge cognitive et adaptation des interfaces lors des phases d'essai	Associer aux essais techniques des évaluations ergonomiques des salles de contrôle et interfaces homme-machine
Exploitation et opérations	Délimitation claire des zones autonomes, procédures de maintenance, gestion des accès, surveillance technique continue	Détection des micro-sommeils, analyse vidéo comme outil de prévention, impact de la vigilance et de la fatigue sur la sécurité	Déployer un double suivi : technique (performance des véhicules, communication, logiciels, etc.) et humain (fatigue, vigilance, comportements en salle de contrôle)
Données et traçabilité	Conservation et exploitation des données opérationnelles pour la sécurité et l'optimisation des processus de production	Nécessité de conserver la confidentialité mais aussi de valoriser le retour visuel pour les opérateurs	Mettre en place une politique de gestion des données intégrée : traçabilité pour la sécurité et usage ergonomique au bénéfice des opérateurs
Amélioration continue	Utilisation des résultats des essais et de l'exploitation pour ajuster la documentation et les procédures	Intégration des retours d'expérience humains (ressenti des opérateurs, charge psychologique)	Combiner les indicateurs techniques et les retours des opérateurs dans un cycle d'amélioration continue

Cette analyse a permis de proposer une démarche complète pour l'intégration des véhicules autonomes dans une mine souterraine. En effet, elle combine les aspects organisationnels, techniques et les dimensions humaines. De plus, elle tient compte de la manière dont les opérateurs

interagissent réellement avec le système autonome. Elle est adaptée au milieu souterrain, où les contraintes physiques, la fatigue et la charge psychologique sont particulièrement fréquentes.

3.4.3 Développement d'une méthodologie de gestion des risques

La méthodologie de gestion des risques proposée dans ce mémoire s'appuie sur la combinaison de deux référentiels normatifs : l'ISO 12100:2010, qui définit les principes généraux de conception sûre des machines, et l'ISO 17757:2019, qui établit les exigences spécifiques aux systèmes autonomes et semi-autonomes utilisés dans l'exploitation minière. L'objectif de cette combinaison est de concevoir une approche complète et adaptée aux enjeux particuliers de l'exploitation souterraine de véhicules autonomes.

3.4.3.1 Spécificités des deux référentiels

La norme ISO 12100 fournit la structure de base pour l'analyse et la réduction des risques. Elle définit une séquence logique et systématique qui comprend :

- l'identification des dangers ;
- l'estimation et l'évaluation des risques ;
- la réduction des risques selon une hiérarchie de mesures.

Elle repose sur un principe fondamental : la prévention doit être privilégiée dès la conception (sécurité intrinsèque), avant d'avoir recours aux dispositifs de protection, puis à l'information et à la formation des utilisateurs. Cette approche garantit une couverture étendue des risques liés aux machines, en intégrant les dimensions techniques, organisationnelles et humaines.

Quant à la norme ISO 17757, elle complète l'ISO 12100 en intégrant les enjeux propres aux véhicules autonomes et semi-autonomes en exploitation minière. Elle met en évidence plusieurs dimensions spécifiques :

- la gestion des zones de fonctionnement autonomes (délimitation, accès, signalisation, surveillance) ;
- la gestion des interactions homme-machine, notamment la transition entre mode manuel et mode autonome ;

- la nécessité d'une fiabilité élevée des systèmes de perception (capteurs, caméras, radars, lidar) et des communications sans fil ;
- les exigences en matière de sécurité fonctionnelle (redondance, diagnostic, reprise après défaillance) ;
- l'intégration de la cybersécurité comme composante essentielle de la sécurité globale ;
- l'attention portée aux facteurs humains et organisationnels, y compris la charge cognitive et la santé psychologique des opérateurs.

3.4.3.2 Justification du choix des deux normes

Bien que les normes ISO 12100:2010 et ISO 17757:2019 soient initialement destinées aux fabricants de machines et d'engins mobiles autonomes, leur mobilisation dans ce mémoire se justifie par leur rôle de références structurantes en matière d'appréciation et de réduction des risques. ISO 12100 fournit une démarche systématique d'identification des dangers et d'estimation des risques sur l'ensemble du cycle de vie des machines industrielles (fixes et mobiles), tandis que ISO 17757 introduit les spécificités liées aux systèmes autonomes et téléopérés, notamment la supervision à distance, la gestion des modes de fonctionnement et les interactions homme-machine.

Dans le contexte des mines souterraines, les exploitants sont directement confrontés aux conséquences opérationnelles, organisationnelles et humaines des choix de conception des véhicules autonomes. Or, les cadres normatifs spécifiquement destinés aux exploitations minières autonomes restent encore limités. L'adaptation de ces deux normes permet ainsi de transposer des exigences de conception vers une démarche opérationnelle d'évaluation des risques, utilisable par les exploitations minières lors de l'intégration, de la mise en service et de l'exploitation des engins autonomes.

Par ailleurs, la sécurité et la fiabilité des véhicules autonomes reposent sur une collaboration continue entre fabricants et exploitants miniers, fondée sur les retours d'expérience issus des conditions réelles d'exploitation souterraine. Les exploitants jouent un rôle clé en identifiant les situations dangereuses, les limites des systèmes et les nouveaux usages, tandis que les fabricants intègrent ces retours pour améliorer les algorithmes, les capteurs, les interfaces et les dispositifs de sécurité. La combinaison des normes ISO 12100 et ISO 17757 s'inscrit dans cette logique de boucle

d'amélioration continue, en fournissant un langage commun et un cadre méthodologique partagé entre conception et exploitation.

Ainsi, l'approche proposée vise à renforcer le lien entre exigences normatives, retours d'expérience terrain et pratiques opérationnelles, afin de contribuer au développement de systèmes autonomes plus sûrs, robustes et durables dans les mines souterraines.

3.4.3.3 Construction de la démarche méthodologique de gestion des risques

Notre démarche méthodologique intègre les étapes génériques définies par l'ISO 12100, et enrichies par les apports contextuels de l'ISO 17757. Elle se définit comme suit.

- Identification des dangers :
 - L'ISO 12100 oriente l'analyse vers des risques classiques (mécaniques, électriques, ergonomiques, environnementaux, etc.).
 - L'ISO 17757 complète cette étape en ajoutant des dangers systémiques liés à l'autonomie (perte de communication, erreur de mode, non-détection d'une personne dans la zone autonome, etc.).
- Estimation et évaluation des risques :
 - L'ISO 12100 propose une démarche fondée sur la gravité des conséquences et la probabilité d'occurrence.
 - L'ISO 17757 apporte des critères adaptés au contexte autonome, tels que la fiabilité des capteurs, la latence des communications, ou encore les temps de réaction des systèmes.
- Réduction des risques :
 - L'ISO 12100 impose la hiérarchie classique (sécurité intrinsèque, ensuite protections techniques, et puis information/formation).
 - L'ISO 17757 traduit cette hiérarchie dans le cadre minier autonome, en précisant par exemple la nécessité de définir des zones d'exclusion, d'installer des systèmes de surveillance continue et de formaliser les procédures de bascule entre modes manuel et autonome.

Le tableau 3.2 résume la combinaison des spécificités des deux normes.

Tableau 3.2 Combinaison des spécificités des normes ISO 12100 : 2010 et ISO 17757 : 2019

Étapes de la gestion des risques	ISO 12100:2010	ISO 17757:2019	Résultat de la combinaison
Identification des dangers	Liste générique des dangers (électriques, mécaniques, gravitationnelles, ergonomiques, etc.)	Introduction des dangers systémiques liés à l'autonomie (communication, perception, confusion des rôles)	Vue complète intégrant dangers classiques et dangers émergents
Estimation et évaluation des risques	Gravité * fréquence d'exposition * probabilité d'occurrence * possibilité d'évitement	Critères spécifiques (fiabilité capteurs, sécurité fonctionnelle, latence des communications)	Évaluation adaptée aux systèmes autonomes
Réduction des risques	Hierarchie des mesures : sécurité intrinsèque, ensuite dispositifs de protection, puis information/formation du personnel	Mesures spécifiques : zones autonomes, surveillance continue, protocoles de transition (autonome, manuel)	Plan de réduction des risques contextualisé au souterrain
Facteurs humains	Approche générale (ergonomie, information, formation)	Dimension accrue (charge cognitive, surveillance en salle de contrôle, santé psychologique)	Intégration complète des dimensions humaines
Organisation et réglementation	Orientation générique (ISO 45001, etc.)	Références explicites au contexte minier et aux exigences opérationnelles	Alignement sur le cadre réglementaire et organisationnel du secteur minier autonome

La combinaison de ces deux normes a permis d'obtenir une méthodologie détaillée grâce à l'ossature de l'ISO 12100 et aux spécificités de l'ISO 17757. Elle prend en compte les risques techniques, organisationnels et humains. De plus, elle traduit les principes normatifs en exigences applicables à la gestion des véhicules autonomes en mine souterraine.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS

Au cours de ce chapitre, nous présenterons les résultats de notre étude documentaire à travers les bénéfices et défis de l'autonomie, la catégorisation des risques émergents, une analyse comparée des cas d'implantation cités dans la littérature, la proposition d'une démarche d'intégration sécuritaire des véhicules autonomes en contexte souterrain et une méthode intégrée d'évaluation des risques SST liés à ces véhicules.

4.1 Avantages et défis de l'intégration des véhicules autonomes dans une mine souterraine

Plusieurs raisons motivent les exploitations minières à introduire des véhicules autonomes dans leurs opérations entre autres l'augmentation de la productivité et la sécurité des travailleurs. Cependant, il est important de noter que cette intégration s'accompagne aussi de défis et d'obstacles. Sur la base de notre étude documentaire, nous avons identifié et regroupé ces avantages et obstacles dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Avantages et obstacles de l'intégration des véhicules autonomes dans les mines souterraines

Items	Avantages	Obstacles et défis
Sécurité, environnement et sûreté	* Réduction de l'exposition humaine aux zones dangereuses * Meilleur équilibre vie privée/vie professionnelle * Réduction de l'empreinte carbone (utilisation des véhicules autonomes et électriques)	* Cybersécurité et confidentialité des données * Réglementation (exigences de sécurité applicables)

Tableau 4.1 Avantages et obstacles de l'intégration des véhicules autonomes dans les mines souterraines (suite et fin)

Items	Avantages	Obstacles et défis
Coûts	* Réduction des coûts liés à la SST (accidents de travail, hospitalisation, maladie, etc.) * Réduction des coûts de production	* Coût d'acquisition élevé des véhicules * Coûts importants de maintenance (capteurs, logiciels, interface utilisateur, etc.) * Coûts des infrastructures de soutien (peut nécessiter la modification des installations du site : information, communication, voies routières, etc.) * Coûts initiaux pour le recrutement et la formation du personnel qualifié * Coûts pour le recrutement des consultants et l'achat des outils de formation du personnel
Efficacité et production	* Augmentation de la productivité * Disponibilité 24h/24, sans temps d'arrêt des véhicules (car ne nécessitent ni changement d'équipe, ni pause) * Durée de vie accrue des véhicules grâce à l'application de la maintenance prédictive	* Communication et réseau (obstacles naturels, absence de visibilité, perte régulière de communication, etc.) * Rareté de personnel qualifié dans l'exploitation des véhicules autonomes * Nécessité de mise en œuvre de programmes de formation spécifiques
Ressources humaines	* Apprentissage des systèmes autonomes et leur exploitation	* Inquiétudes liées à la perte d'emploi * Transformations des rôles des opérateurs systèmes * Résistance au changement

L'augmentation de la productivité a été identifiée comme l'un des principaux avantages de l'introduction des véhicules autonomes dans les mines (GMG, 2023; Government of Western Australia, Department of Mines and Petroleum Resources Safety, 2015). Le fabricant Komatsu America a annoncé que son système autonome FrontRunner a dépassé un milliard de tonnes de matériaux transportés à la mine Gabriela Mistral de CODELCO, au Chili, depuis le lancement de cette première mine de cuivre autonome en 2008 (Moore, 2023). Par ailleurs, l'entreprise BHP avait déclaré que le transport autonome (50 camions en exploitation) à sa mine de Pilbara en Australie, avait permis de réduire les coûts de production de 20% en fin 2017 (Williams, 2019). Selon Ellis (2023), une autre mine en Australie Occidentale a signalé une augmentation de 37% du taux de forage et une disponibilité importante de ses foreuses autonomes. Les avantages pour la

santé et la sécurité de ces véhicules sont nombreux (Paraszczak et al., 2015). L'exposition aux risques musculosquelettiques, y compris ceux liés aux vibrations corporelles globales, est supprimée, de même que les risques de collision avec les véhicules et les traumatismes crâniens causés par le coincement des godets LHD dans les nervures lors de leurs déplacements (Robin Burgess-Limerick et al., 2025). Rio Tinto a également indiqué une baisse considérable des collisions sur ses sites autonomes par rapport à ceux conventionnels (NSW Resources, 2025). Selon Moreau et al. (2021), l'introduction de l'automatisation dans les mines de cuivre souterraines a entraîné une réduction de 20% à 16% de l'exposition des travailleurs aux particules diesel. Dans le même sens, une analyse des incidents impliquant des camions de transport, qu'ils soient manuels ou automatisés, menée à la mine Jumblebar de BHP en Australie-Occidentale sur une période de quatre ans couvrant l'introduction du transport autonome, a révélé une diminution de plus de 90 % du taux global d'incidents durant cette période (Pascoe et al., 2022).

4.2 Enjeux de SST et risques liés aux véhicules autonomes dans les mines souterraines

L'étude documentaire a permis de constater que l'adoption progressive des véhicules autonomes a modifié l'organisation du travail, les méthodes de production, les comportements humains et les pratiques de sécurité dans les mines souterraines. En effet, l'exploitation de ces véhicules a entraîné de nouveaux scénarios d'accidents potentiels encore non enregistrés dans les bases de données des professionnels en santé et sécurité au travail (SST).

4.2.1 Risques émergents associés à l'autonomie des véhicules autonomes en milieu souterrain

L'introduction des véhicules autonomes dans les mines souterraines s'accompagne forcément de risques émergents en SST (Badri et al., 2018). Selon Ben Aziza et al. (2023), ces risques peuvent être de nature physique, technologique, cognitif et psychosocial.

4.2.1.1 Risques physiques

Le risque de collision est le plus fréquemment abordé dans la littérature lorsqu'on s'intéresse aux différents aspects liés à la santé et à la sécurité au travail (SST) (Ben Aziza et al., 2023). En effet, l'exiguïté des voies de circulation, les contraintes propres aux mines souterraines (poussières, visibilité réduite, etc.), le déplacement des véhicules autonomes et leurs interactions potentielles

avec les travailleurs présentent des risques d'accidents impliquant les véhicules autonomes, les véhicules manuels et les personnes. D'après des échanges avec un fabricant d'engins autonomes, les pratiques de sécurité actuelles recommandent d'interdire l'accès des ZFA aux travailleurs et véhicules manuels afin d'éviter des interactions entre ces trois composantes (véhicules autonomes, véhicules manuels et les travailleurs). Néanmoins, pour des raisons de productivité et sans interrompre totalement le fonctionnement de la flotte autonome (l'ensemble des engins autonomes) dans la ZFA, l'exploitant peut autoriser un opérateur à intervenir dans la zone en cas de panne sur l'un des engins. De plus, une intervention humaine est nécessaire en souterrain pendant le quart de travail afin d'assurer le ravitaillement (carburant, graisse, urée, etc.) et de réaliser les vérifications pré-opérationnelles des camions (Institut national des mines, 2020). La survenue de tels scénarios accroît la probabilité de collisions entre les véhicules autonomes et les travailleurs. Afin de prévenir les collisions entre opérateurs et véhicules autonomes, Zhang et al. (2022) ont mis en place une technique de coordination basée sur un profil de vitesses adapté et un comportement communicatif lors des croisements. Après expérimentation, cette approche a donnée de meilleurs résultats en comparaison aux autres approches d'évitement de collisions couramment utilisées comme le « Model Predictive approach » (en français, modèle approche prédictive).

Par ailleurs, Liu et al. (2018) estiment que le risque lié à la stabilité a un impact significatif sur la sécurité des véhicules autonomes. Ainsi, les auteurs ont étudié les véhicules autonomes rapides, utilisés dans des environnements industriels ou miniers. Dans ce sens, ils ont développé un système de contrôle qui aide à garder le véhicule stable, même sur des sols irréguliers, avec des pentes ou des virages. Ce système prend en compte plusieurs règles de sécurité comme :

- Le point de basculement nul (*zero-tilting moment point*) : pour éviter que le véhicule ne bascule ;
- Le point de moment nul (*zero moment point*) : lié à l'équilibre du véhicule ;
- Le couloir de sécurité latéral (*lateral safety corridor*) : pour éviter que le véhicule ne sorte de sa trajectoire ou entre en collision avec des obstacles fixes ou mobiles.

La conception physique des postes de travail de contrôle à distance présente certaines limites. Par exemple, des moniteurs placés trop en hauteur peuvent provoquer une extension excessive du cou et de la tête, ainsi qu'une sollicitation visuelle accrue. De plus, les interfaces nécessitant une saisie fréquente peuvent entraîner une utilisation intensive de dispositifs de pointage, comme les souris,

ce qui peut engendrer de l'inconfort ou des troubles musculosquelettiques (Robin Burgess-Limerick et al., 2025). En outre, les véhicules autonomes sont également associés à d'autres types de risques.

4.2.1.2 Risques technologiques

Le véhicule autonome fonctionne à l'aide de capteurs (LiDAR, radar, caméras, etc.), logiciels, connectivité, etc. Une défaillance de ces systèmes peut altérer le processus décisionnel du véhicule autonome, avec pour conséquence potentielle la survenue d'accidents.

La sécurité des données en temps réel est primordiale dans tout milieu de travail. Elle en est d'autant plus capitale dans les environnements à haut risque et dynamiques, comme ceux des mines souterraines mobiles autonomes. Selon Ben Aziza et al. (2020), il est essentiel que la collecte et l'utilisation des données soient sécurisées et que le fonctionnement des véhicules autonomes garantisse la sécurité des travailleurs avec lesquels ils peuvent interagir. La mauvaise gestion des données expose l'exploitation minière autonome à des cyberattaques. Ces attaques cybernétiques peuvent menacer les communications, le stockage des données, les actionneurs, les positions GPS, les unités de calcul ainsi que les capteurs liés à la perception et à la prise de décision (Flaus, 2019). Selon Gaber et al. (2021), elles peuvent entraîner une perte de qualité de service, une perte d'intégrité et de qualité des données, ainsi que des pertes en vies humaines et matérielles. Une attaque de type MITM (Man-in-the-Middle) contre un véhicule autonome pourrait être catastrophique et se traduire par des collisions, blocage du trafic minier, voire mise en danger des travailleurs (Flaus, 2019).

Par ailleurs, Ren et al. (2020) ont mis en évidence plusieurs attaques GPS réalistes, classées en deux catégories principales : l'usurpation d'identité et le brouillage. Selon ces auteurs, l'une des attaques GPS les plus rencontrées consiste à dévier la position correcte des véhicules autonomes vers une position incorrecte (c'est-à-dire l'usurpation d'identité) en fabriquant un signal parasite. Quant à l'annulation (brouillage), forme avancée d'attaque GPS, elle consiste à interférer discrètement avec les signaux légitimes en générant des signaux opposés, cryptés ou modulés, afin de les neutraliser (Gaber et al., 2021). De la même manière, une caméra dont les performances sont altérées, par exemple en raison d'une image floue, peut enfreindre les normes de sécurité et accroître le risque d'accidents graves, notamment en cas d'attaques ciblant le système de vision (Gaber et al., 2021). Ce type d'attaque utilise une matrice laser pour aveugler les caméras à une

distance inférieure à un demi-mètre, pendant quelques secondes, causant des dommages irréversibles et perturbant gravement le fonctionnement autonome du système. La cybersécurité devient ainsi un défi majeur pour le déploiement sécurisé des véhicules autonomes dans la mine. Pour prévenir cela, Tsung et al. (2022) ont utilisé l'infonuagique pour proposer une solution afin de réduire le délai de traitement des données brutes reçues des véhicules autonomes. Ce délai peut avoir un impact sur la sécurité, car un problème détecté mais non résolu en temps réel peut entraîner des accidents de travail. La gravité de ces accidents peut être élevée en cas de trafic dense de véhicules autonomes dans la mine. La plateforme de télédétection proposée par les auteurs doit être installée directement sur les flancs du véhicule autonome, afin d'assurer une surveillance continue de son environnement périphérique (Tsung et al., 2022). L'expérimentation de ce système a permis de gagner du temps et de réduire les coûts de communication. Comme solution contre les attaques des caméras, Petit et al. (2015) recommandent l'utilisation de technologies optiques telles que des filtres de coupure proche infrarouge amovibles et des lentilles photochromiques.

Par ailleurs, Kyrkou et al. (2020) se sont penchés sur l'utilisation de l'apprentissage automatique pour détecter et atténuer les attaques à distance des caméras, en s'appuyant sur un dispositif anti-piratage dédié. En somme, Gaber et al. (2021) soutiennent que la résolution des problèmes de cybersécurité des systèmes de surveillance de l'environnement minier peut garantir la sécurité des opérations autonomes.

Le bon fonctionnement des véhicules autonomes nécessite une connexion en temps réel, fiable et continue dans la mine pour assurer une communication efficace. D'après leur étude sur les enjeux et défis des systèmes de transport autonome dans l'industrie minière, Gaber et al. (2021) estiment que les contraintes géographiques ainsi que les caractéristiques des véhicules autonomes opérant en milieu minier rendent les communications sans fil (comme le réseau LTE) indispensables pour assurer le suivi et la connectivité des engins autonomes. Cependant, ces technologies sont confrontées à plusieurs défis, notamment les interférences de fréquence, la gestion des canaux et le brouillage des signaux. Une perte de communication dans la mine entraîne également une perte de liaison entre le centre de commande (ou la salle de téléopération) et les engins autonomes. Cet incident peut compromettre la prise de décision des véhicules autonomes et entraîner des accidents. C'est le cas de la perte de communication ayant entraîné une collision entre un camion autonome et une excavatrice manuelle à la mine de charbon à ciel ouvert de Goonyella, appartenant à BHP Mitsubishi Alliance, dans le Queensland en Australie (Williams, 2019). En effet, le vérin du bras

de l'excavatrice manuelle avait été endommagé, sans que l'opérateur n'en soit blessé. Cependant, les technologies de communication sans fil (la 5G, la LTE, etc.) seraient aussi exposées à différentes formes d'attaques de cybersécurité comme le cas des attaques de brouillage (Arjoun & Faruque, 2020). À cet effet, lors du développement des véhicules autonomes intégrant ces technologies, Gaber et al. (2021) recommandent de mettre en place une stratégie de sécurité globale afin d'assurer leur intégration sécurisée dans les mines souterraines autonomes.

4.2.1.3 Risques cognitifs

L'intégration des VA dans l'exploitation minière souterraine modifie les méthodes de travail, les comportements des travailleurs et les conditions de travail. Bien que cette transformation apporte une sécurité aux travailleurs en les soustrayant des zones dangereuses, elle s'accompagne d'une exposition aux facteurs cognitifs. Selon une étude sur l'impact de l'introduction des véhicules autonomes dans les mines souterraines, les travailleurs interrogées évoquent plusieurs problèmes organisationnels rencontrés dans leurs activités notamment ceux liés à la fatigue mentale (due à une vigilance prolongée), le travail sur fauteuil (pouvant entraîner des problèmes ergonomiques et du sommeil car l'opérateur est déconnecté de l'environnement de travail réel), la supervision des opérations à distance (entraîne une surcharge cognitive liée à la surveillance simultanée de plusieurs interfaces ou véhicules autonomes) (Robin Burgess-Limerick et al., 2025). Des erreurs humaines, telles qu'une perte de conscience situationnelle, des erreurs de mode (autonome, semi-autonome ou manuel) ou de saisie (par exemple, une interface confuse ou surchargée peut amener l'opérateur à cliquer sur le mauvais bouton ou à mal interpréter les options affichées) peuvent également survenir.

4.2.1.4 Risques psychosociaux

D'après une étude de Burgess-Limerick et al. (2025), l'isolement croissant des opérateurs confinés dans les salles de commande influence négativement plusieurs dimensions psychosociales du travail. La transition d'un poste de terrain vers un environnement de supervision à distance peut provoquer une perte de sens, une diminution du sentiment d'utilité et une rupture du lien social avec les collègues de terrain. De plus, la nécessité de maintenir un haut niveau de vigilance pour détecter des anomalies ou signaux d'alerte crée une charge mentale élevée.

Les opérateurs rapportent également une baisse de la motivation, une fatigue cognitive accrue due à la surveillance continue des écrans, et parfois un sentiment d'exclusion du collectif de travail traditionnel, ce qui peut générer du stress. Ces effets s'expliquent par la modification profonde du rôle de l'opérateur, passant d'un acteur physique de la production à un observateur technique distant.

Par ailleurs, l'introduction de composants autonomes peut entraîner des changements de comportement, notamment une confiance excessive ou insuffisante, ce qui risque de compromettre les bénéfices attendus en matière de sécurité. Ces facteurs peuvent entraîner des conséquences sur la santé des opérateurs en salle de contrôle et accroître le risque d'accidents (Robin Burgess-Limerick et al., 2025). Ces enjeux potentiels soulignent la nécessité de tenir compte des capacités et des limites humaines lors de la mise en œuvre du transport autonome (Horberry, 2012; Horberry et al., 2018). La figure 4.1 illustre les catégories de risque susmentionnées.

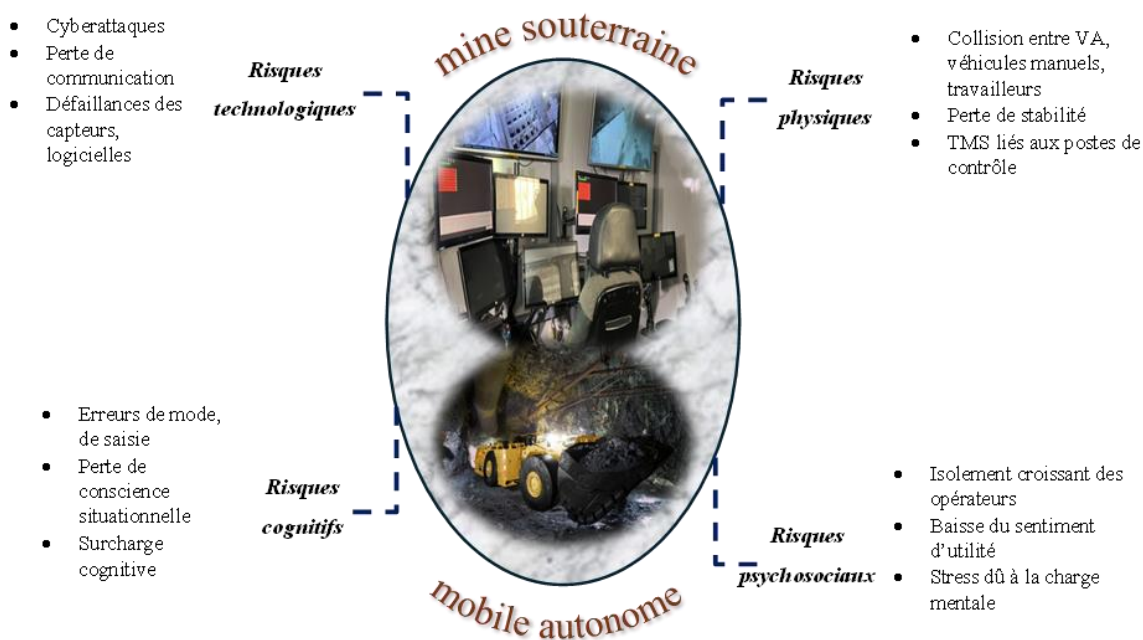


Figure 4.1 Risques émergents SST dans une mine souterraine mobile autonome

L'intégration des véhicules autonomes dans les mines souterraines entraîne également des répercussions sur la nature des tâches des travailleurs.

4.2.2 Transformation des rôles et responsabilités des travailleurs

Les travaux de Burgess-Limerick et al. (2025) soulignent l'importance d'une formation adéquate des travailleurs. Ceci s'explique par le fait que les travailleurs qui étaient autrefois des opérateurs sur le terrain (conducteurs des véhicules miniers conventionnels) seront désormais des superviseurs (téléopérateurs) situés dans une salle de commande. Ce changement de rôle peut entraîner une perte d'accès à l'information dont bénéficiaient auparavant les opérateurs sur le terrain, ce qui peut retarder la détection d'événements inhabituels. Il s'agit de la perte de conscience de la situation par l'opérateur à distance. Elle est souvent à l'origine de plusieurs accidents impliquant des véhicules autonomes. Par ailleurs, la conception et l'entretien adéquats des routes de transport ont été reconnus comme une exigence essentielle de sécurité pour les camions autonomes (Benlaajili et al., 2021; Thompson, 2011).

Selon Burgess-Limerick et al. (2025), l'adoption des véhicules autonomes pose de grands défis aux sociétés minières pour recruter, former et conserver les opérateurs à distance et ceux dédiés à la maintenance. En effet, l'utilisation d'un équipement à distance, comme un véhicule autonome, requiert un ensemble de compétences distinct de celui requis pour l'exploitation d'un équipement depuis la cabine d'un véhicule conventionnel (Immersive Technologies, 2025). Il est donc important que les opérateurs à distance suivent de nouvelles formations telles que la téléopération, l'ergonomie cognitive et bien d'autres (Immersive Technologies, 2025). De même, la maintenance des véhicules autonomes, leur calibration, leur paramétrage ou la gestion des logiciels embarqués nécessitent des compétences techniques avancées. Cela crée également de nouveaux besoins en formation dans des domaines comme la robotique, l'intelligence artificielle, la cybersécurité ou les systèmes de contrôle. Les équipes de travail doivent être en mesure de collaborer efficacement avec des experts en technologies de l'information, des ingénieurs systèmes et des techniciens spécialisés.

Selon le GMG (2023), l'introduction des véhicules autonomes dans une mine souterraine peut apporter des controverses dans les rôles et responsabilités des travailleurs de la mine. Cela devient particulièrement problématique lorsqu'il faut déterminer les responsabilités en cas d'incident ou lors de la mise en fonctionnement de la ZFA. Il est donc important de mettre en place une stratégie d'accompagnement au changement afin de mieux définir l'évolution des rôles et responsabilités des différentes parties prenantes par rapport à la situation antérieure (GMG, 2023). La réussite de ce changement nécessite la contribution de divers groupes opérationnels notamment le personnel

d'exploitation et d'entretien du site minier (y compris l'entretien mécanique et technique), les chercheurs et régulateurs, les ingénieurs concepteurs et planificateurs des mines (chefs de projet, directeurs de mine, personnel infrastructure et informatique, etc.), FEO (fabricants d'équipements d'origine), prestataires de services et intégrateurs de systèmes, représentants en matière de santé et sécurité et personnel d'intervention d'urgence, etc. Pour mener à bien ce projet, le GMG (2023) recommande de créer une matrice d'attribution des responsabilités (telle que RACI « responsable, approuvateur, consulté, informé »).

Actuellement, les bonnes pratiques de sécurité dans les mines souterraines autonomes interdisent les interactions entre les véhicules autonomes et les travailleurs, d'une part, et, d'autre part, entre les véhicules autonomes et les véhicules conventionnels. Les zones de fonctionnement autonome devraient être délimitées et interdirent l'accès aux personnes et aux véhicules conventionnels. Cependant, une analyse de 53 incidents enregistrés par le ministère des mines, de la réglementation et de la sécurité de l'industrie de l'Australie-Occidentale, et impliquant des camions de transport autonome entre janvier 2010 et mai 2021, révèle que ces pratiques n'ont pas été respectées. Ces incidents sont liés à plusieurs causes notamment : la perte de conscience de la situation par l'opérateur, perte de traction du VA associée aux routes mouillées (glissade), erreur de mode (passage par inadvertance d'un mode de fonctionnement à un autre), les erreurs de saisie (par exemple l'opérateur saisit une vitesse incorrecte, paramétrage incorrect de la zone de travail, etc.), les lacunes des logiciels (l'absence de test des mises à jour) et bien d'autres (Robin Burgess-Limerick et al., 2025). Ce nombre d'incidents est très élevée pour une courte période d'activités. On note également de nombreux accidents impliquant des véhicules autonomes dans les mines souterraines. Il s'avère donc nécessaire de consulter des études de cas sur l'intégration des véhicules autonomes citées dans la littérature.

4.3 Véhicules autonomes en milieu souterrain : retour d'expériences et enseignements de cas réels d'intégration

Dans le cadre de cette partie de nos résultats, une analyse comparative a été réalisée à partir de deux cas d'implantation de véhicules autonomes en milieu souterrain. L'objectif était d'identifier les facteurs humains, organisationnels et techniques pris en compte lors du processus d'intégration, les difficultés rencontrées, ainsi que les leviers favorisant une mise en œuvre réussie. Les cas étudiés sont :

- l'étude menée par Burgess-Limerick et al. (2025) portant sur l'intégration de chargeuses autonomes LHD à la mine souterraine de NorthParkes en Australie ;
- et le guide du Global Mining Guidelines Group (2023), dans sa deuxième version des directives sur la mise en œuvre des systèmes autonomes dans l'exploitation minière.

4.3.1 Facteurs humains, organisationnels et techniques

4.3.1.1 Facteurs humains

Dans le cas de la mine NorthParkes, l'étude montre que la réussite de l'intégration des véhicules autonomes dépend avant tout de la prise en compte des limites humaines et d'une conception centrée sur l'utilisateur (Burgess-Limerick et al., 2025). Cette étude met en évidence plusieurs erreurs humaines observées durant les premières étapes de l'automatisation : une dépendance excessive à l'opérateur humain, une surcharge mentale liée à la surveillance des systèmes, une perte de conscience de la situation et des erreurs dans la sélection du mode de fonctionnement (manuel, semi-autonome ou autonome).

Ces constats démontrent qu'un système autonome ne peut être efficace que si les interfaces homme-machine sont claires, simples et réactives, permettant aux opérateurs de comprendre rapidement les informations, de réagir à temps et de réduire les risques d'erreurs de manipulation.

Un autre facteur clé de succès à NorthParkes a été la communication constante entre les concepteurs du système, les opérateurs et le fabricant. Cette collaboration étroite a permis d'améliorer progressivement l'interface de commande et d'adapter le système aux besoins concrets du terrain. Par exemple, plusieurs problèmes techniques ont été résolus rapidement grâce à un retour d'expérience direct des opérateurs. Cette approche illustre les avantages d'une co-conception participative, où les opérateurs ne sont pas de simples exécutants, mais des partenaires actifs du processus d'intégration et d'amélioration du système autonome (Burgess-Limerick et al., 2025).

En revanche, le GMG (2023) adopte une approche plus stratégique et organisationnelle de la dimension humaine. Ses directives insistent surtout sur la gestion du changement et la mobilisation des employés, considérées comme des éléments essentiels pour réussir l'introduction de l'autonomie dans une mine. Le GMG (2023) recommande de préparer en amont les transformations des rôles, des compétences et de la culture de travail, et de favoriser l'adhésion des travailleurs en

les impliquant dès les premières étapes du projet. Il souligne aussi l'importance de définir clairement les objectifs du projet, les responsabilités de chacun et les critères de réussite à travers une charte de projet structurée.

Toutefois, contrairement à Burgess-Limerick et al. (2025), les directives du GMG abordent peu les aspects ergonomiques et cognitifs, comme la fatigue, la charge mentale ou la confiance envers les systèmes automatisés. Elles mettent davantage l'accent sur la planification organisationnelle, la formation du personnel et la structuration du changement, plutôt que sur les dimensions psychologiques ou comportementales liées à l'opérateur.

4.3.1.2 Facteurs organisationnels et gestion du changement

L'étude de la mine NorthParkes montre que la communication ouverte et constante entre les ingénieurs, les opérateurs et les gestionnaires a été un élément clé de réussite de l'intégration des véhicules autonomes (Burgess-Limerick et al., 2025). Le fait d'échanger régulièrement des informations a permis de corriger rapidement les problèmes techniques, comme la détection des collisions ou le patinage des roues sur sol humide. Cette manière de travailler, flexible et collaborative, a non seulement amélioré la performance technique du système, mais aussi renforcé la confiance entre les différents acteurs. Elle a facilité le changement culturel nécessaire pour passer d'un travail manuel à un environnement automatisé.

De son côté, le GMG (2023) adopte une approche plus structurée et planifiée pour accompagner la transformation vers l'autonomie. Le GMG distingue deux contextes d'application : les sites greenfield (nouvelles mines) où tout peut être conçu dès le départ pour accueillir l'autonomie, et les sites brownfield (mines déjà existantes) où il faut adapter les systèmes et les pratiques actuelles. Il recommande de réviser régulièrement le plan de gestion du changement pendant tout le cycle de vie du projet et de mesurer plusieurs indicateurs clés : la satisfaction des parties prenantes, le niveau d'adoption de la technologie, la sécurité et la performance globale de l'organisation.

En comparaison, l'approche de NorthParkes repose sur une dynamique expérimentale et participative, où les solutions émergent du terrain à partir des retours des opérateurs. À l'inverse, le GMG propose une approche stratégique et normative, qui définit des lignes directrices et une structure de gouvernance claire pour gérer le changement à l'échelle de l'entreprise. Ces deux approches se complètent parfaitement : celle de NorthParkes favorise l'apprentissage et

l'adaptation locale, tandis que celle du GMG assure la cohérence globale, la conformité réglementaire et la durabilité du processus d'intégration.

4.3.1.3 Facteurs techniques et défis opérationnels

Dans le cas de la mine NorthParkes, les défis techniques observés concernent surtout la fiabilité des capteurs, les problèmes de perception dus à la poussière et la qualité de l'affichage des informations sur les interfaces de contrôle. Ces problèmes sont typiques des environnements souterrains, où la visibilité est réduite et les conditions sont très variables.

Pour y faire face, Burgess-Limerick et ses collègues décrivent plusieurs solutions pratiques développées directement sur le terrain. Par exemple, les scanners laser déjà utilisés pour la navigation autonome ont été réutilisés pour détecter la proximité des parois lorsque le véhicule est en mode manuel, ce qui permet d'éviter les collisions. De même, des capteurs de détection de patinage ont été installés pour signaler une perte d'adhérence sur les routes mouillées et ainsi prévenir l'endommagement des roues (Burgess-Limerick et al., 2025).

Ces améliorations techniques montrent l'importance d'une collaboration continue entre les opérateurs et les concepteurs. Grâce à une boucle de rétroaction rapide, les problèmes observés sur le terrain ont pu être corrigés rapidement, renforçant la sécurité et la fiabilité du système autonome. Cette approche démontre que la réussite d'un projet autonome repose sur une innovation adaptative, capable d'évoluer au fil des retours d'expérience du personnel.

De son côté, le GMG (2023) traite les aspects techniques sous un angle plus global et stratégique. Ses recommandations couvrent l'ensemble des éléments nécessaires à la fiabilité d'un système autonome : la cybersécurité, la protection et l'intégrité des données, la qualité de l'infrastructure informatique (IT), ainsi que la gestion des zones autonomes.

Le GMG (2023) recommande notamment de mettre en place un plan intégré de sécurité et de gestion des risques, englobant la configuration des machines, la communication entre véhicules autonomes et opérateurs, ainsi que la maintenance des infrastructures. Ce plan doit garantir que les systèmes soient sûrs, résilients et interconnectés.

Cependant, contrairement à l'approche très concrète observée à NorthParkes, les directives du GMG restent plus générales. Elles fournissent un cadre de référence applicable à différents types

de mines, mais laissent à chaque organisation minière la responsabilité d'adapter ces recommandations selon ses contraintes opérationnelles, technologiques et géographiques.

4.3.1.4 Difficultés rencontrées et limites observées

Dans le cas de la mine NorthParkes, plusieurs limites importantes ont été observées lors de l'intégration des véhicules autonomes. Selon Burgess-Limerick et al. (2025), les principaux problèmes rencontrés concernent :

- l'accumulation de poussière sur les capteurs et les caméras, ce qui réduit leur performance et provoque parfois des dysfonctionnements du système ;
- la fatigue visuelle et mentale des opérateurs travaillant dans les salles de commande, causée par la surveillance prolongée des écrans ;
- la multiplication des alarmes et signaux d'erreur, qui peut entraîner une surcharge cognitive et amener les opérateurs à ignorer des alertes importantes ;
- enfin, la difficulté à détecter certaines anomalies à distance, les opérateurs n'ayant pas toujours une vision complète ou en temps réel de la situation souterraine.

Ces difficultés montrent qu'il est essentiel d'améliorer les systèmes techniques et ergonomiques liés à l'exploitation autonome. Les auteurs recommandent, par exemple, de développer des dispositifs de nettoyage automatique pour les capteurs et les caméras, de réduire le nombre d'alarmes non pertinentes pour éviter la confusion, et de concevoir des postes de téléopération plus ergonomiques, mieux adaptés à la posture, à la charge mentale et au confort visuel des opérateurs (Burgess-Limerick et al., 2025).

De son côté, le GMG (2023) met également en avant des défis similaires, mais à une échelle plus globale et systémique. Il souligne notamment :

- le manque d'harmonisation entre les différents fournisseurs d'équipements autonomes, ce qui complique l'interopérabilité entre machines de marques différentes ;
- l'absence d'un cadre réglementaire unifié au niveau international pour encadrer la sécurité et les performances des systèmes autonomes ;
- la complexité technique liée à la communication entre systèmes hétérogènes (machines, logiciels, réseaux) ;

- et la difficulté de coordination entre les multiples acteurs impliqués dans la chaîne d’approvisionnement (constructeurs, exploitants miniers, autorités réglementaires, etc.).

Ces constats montrent que l’intégration des véhicules autonomes dans les mines ne peut pas se limiter à un seul aspect technique. Elle nécessite une approche interdisciplinaire mobilisant plusieurs domaines : l’ingénierie (pour la fiabilité technique), la santé et sécurité au travail (SST) (pour la protection des opérateurs), la gestion du changement (pour accompagner les transformations humaines et organisationnelles) et la gouvernance technologique (pour assurer la cohérence entre les acteurs et les systèmes).

4.3.1.5 Leviers et conditions de succès pour une intégration réussie

Les deux cas étudiés mettent en évidence plusieurs facteurs clés de réussite pour intégrer les véhicules autonomes dans une mine souterraine de manière efficace et sécuritaire.

Tout d’abord, la communication continue et la construction collaborative des solutions avec les opérateurs apparaissent comme un levier essentiel. Dans le cas de NorthParkes, cette communication permanente entre les ingénieurs, les opérateurs et le fabricant a permis d’ajuster rapidement les interfaces et d’améliorer la fiabilité des systèmes. Du côté du GMG, cette même logique est étendue à l’ensemble des parties prenantes (opérateurs, gestionnaires, concepteurs et régulateurs) pour garantir la transparence et l’adhésion collective au projet.

Ensuite, la formation ciblée et l’accompagnement du changement jouent un rôle fondamental. Ces actions permettent de renforcer les compétences des travailleurs, d’assurer une bonne compréhension des technologies autonomes et de réduire la résistance au changement souvent observée dans les milieux fortement mécanisés. Cette démarche favorise une transition plus fluide entre les pratiques traditionnelles et les nouvelles méthodes de travail liées à l’autonomie.

La présence active du fabricant tout au long du processus constitue également un facteur de succès. Comme l’ont montré Burgess-Limerick et al. (2025), cette collaboration directe facilite la résolution rapide des problèmes techniques et contribue à garantir un soutien ergonomique et fonctionnel continu pour les utilisateurs finaux.

Le GMG (2023) recommande par ailleurs d’instaurer un cadre de gouvernance clair et progressif, basé sur une planification par étapes (allant d’un projet pilote à une intégration complète de la flotte

autonome). Cette approche permet de tester les systèmes dans des conditions réelles, d'évaluer les risques à chaque phase et d'ajuster la stratégie avant le déploiement à grande échelle.

Enfin, les deux études soulignent l'importance d'une surveillance continue des indicateurs clés tels que la sécurité, la productivité, la fiabilité des équipements et la mise à jour régulière des analyses de risque. Ce suivi constant garantit une amélioration continue du système et une adaptation rapide aux imprévus techniques ou organisationnels.

En somme, Burgess-Limerick et al. (2025) offrent une vision concrète et empirique centrée sur les facteurs humains et ergonomiques dans la conduite du changement technologique, tandis que le GMG (2023) propose une approche structurée et managériale, axée sur la standardisation et la sécurité du déploiement à l'échelle organisationnelle.

Ainsi, la complémentarité de ces deux approches, l'une ancrée dans le terrain et l'autre dans la gouvernance stratégique, offre une base solide pour élaborer une démarche d'intégration pratique, progressive et sécuritaire des véhicules autonomes dans les mines souterraines.

4.4 Proposition d'une démarche d'intégration

L'introduction des véhicules autonomes dans une mine souterraine exige une approche globale et structurée, visant à assurer la sécurité du personnel à chaque étape du processus. Pour être efficace, cette intégration doit reposer sur plusieurs volets complémentaires, chacun définissant de façon claire ses sous-éléments (méthodes, processus, outils de suivi, indicateurs de performance, démarches opérationnelles, etc.) afin de faciliter leur mise en œuvre concrète dans l'environnement minier. À la suite de l'analyse croisée entre les travaux du GMG et ceux de Burgess-Limerick, il ressort que la réussite de cette intégration repose sur la prise en compte de six dimensions essentielles, couvrants les aspects techniques, organisationnels, humains et réglementaires. Cela est illustré par la figure 4.2. La démarche proposée doit être considérée comme une première étape dans un processus plus large de développement méthodologique.

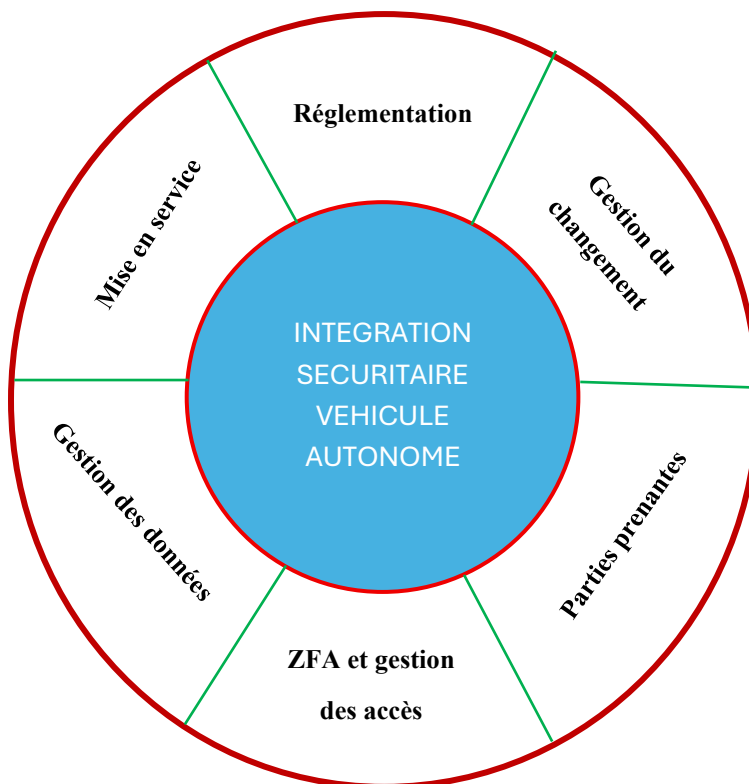


Figure 4.2 Cadre intégré pour l'introduction des véhicules autonomes dans une mine souterraine

4.4.1 Réglementation

Le volet réglementaire est crucial dans cette démarche d'intégration, car c'est lui qui conditionne la conformité et la sécurité des véhicules autonomes. L'entreprise devrait donc suivre un processus d'intégration réglementaire.

4.4.1.1 Processus d'intégration réglementaire

L'entreprise doit suivre les étapes suivantes :

- Cartographier les exigences normatives applicables : cette étape consiste à répertorier toutes les normes internationales et nationales applicables à l'exploitation des véhicules autonomes en milieu souterrain. Par exemple les normes ISO 12100 (sécurité des machines, principes généraux de gestion des risques), ISO 17757 (sécurité des systèmes autonomes et semi-autonomes), la norme canadienne CSA M424.0-2022 (sécurité des engins souterrains) ;

- Analyser la conformité réglementaire par rapport aux lois et règlements nationaux (santé sécurité au travail, code minier, réglementation routière souterraine) ;
- Établir un registre des parties prenantes réglementaires : organismes de normalisation, autorités gouvernementales, syndicats, opérateurs miniers, communautés locales ;
- Intégrer la conformité dès la conception des procédures opérationnelles : par exemple, délimitation des zones autonomes, validation des systèmes de freinage (CSA M424.3), intervention dans une zone autonome, exigences de communication homme-machine ;
- Planifier un processus d'homologation interne et externe avant la mise en service
- Mettre en place une veille réglementaire continue (ISO, CSA, GMG, autorités locales)

Le tableau 4.2 présente une synthèse de quelques références, leurs exigences clés et leur applicabilité au niveau de l'entreprise.

Tableau 4.2 Tableau de synthèse normatif

Références	Exigences clés	Application pratique en entreprise
ISO 12100:2010 - Sécurité des machines	Identifier les dangers, évaluer les risques, définir des mesures de maîtrise	Élaborer une analyse de risques spécifique aux véhicules autonomes souterrains
ISO 17757:2019 - Systèmes autonomes et semi-autonomes	Définir les niveaux d'autonomie, l'interface homme-machine, sécurité fonctionnelle	Rédiger un plan de déploiement des véhicules autonomes avec des procédures d'urgence
CSA M42.0-2022 - Équipements mobiles souterrains	Exigences de sécurité et performance (freinage, motorisation, systèmes de contrôle)	Vérification technique des engins avant exploitation (audit de conformité)
Régulateurs internationaux (MSHA - USA, CEI - Europe, etc.)	Homologation des équipements et conformité SST	Faire certifier les équipements par des organismes compétents
Parties prenantes (syndicats, communautés, opérateurs, etc.)	Acceptabilité sociale et organisationnelle	Consultation et communication transparente lors de l'intégration

4.4.1.2 Adaptation au contexte québécois

Pour une meilleure application de ce processus au niveau du Québec, il doit s'aligner aux exigences des organismes locaux. Le tableau 4.3 présente une approche d'adaptation au contexte du Québec.

Tableau 4.3 Adaptation réglementaire au Québec

Références québécoises	Exigences	Application pratique
CNESST : Loi sur la santé et la sécurité au travail, règlement santé et sécurité du travail dans les mines, code de sécurité pour les travaux de construction, etc.	Obligation de prévention, sécurité des zones d'accès, signalisation, etc.	* Élaborer un plan SST spécifique aux véhicules autonomes * Impliquer la CNESST pour une meilleure prise en compte des exigences locales
AMQ - guides pratiques	Recommandations pour la gestion des innovations technologiques	Impliquer l'AMQ dans la phase d'intégration
MELCCFP - Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs	Protection contre les rejets (huile, batteries, émissions)	* Vérification des systèmes électriques/batteries lithium-ion * Plan de gestion des déchets associés aux VA

4.4.2 Gestion du changement

Selon les recommandations du GMG (2023), l'élaboration d'un plan de gestion du changement constitue une étape incontournable tout au long du processus de mise en œuvre des véhicules autonomes en milieu souterrain. L'annexe A (tableau A.1) de ce document présente une proposition d'approche de gestion du changement basée sur les recommandations du Global Mining Guidelines Group, de Burgess-Limerick sur les facteurs humains, ainsi que sur les pratiques de gestion du changement en ingénierie des systèmes. L'approche prend en compte plusieurs volets notamment un diagnostic initial, la stratégie de déploiement, l'appropriation de l'automatisation par les travailleurs, etc.

4.4.3 Responsabilités des parties prenantes

Le GMG (2023) a souligné l'importance de définir une matrice de responsabilités des parties prenantes lors de l'intégration des véhicules autonomes en milieu souterrain. À cet effet, l'analyse croisée de ses recommandations et de Burgess-Limerick sur les facteurs humains a permis de

ressortir une matrice synthétique des responsabilités des parties prenantes. Cela est illustré par l'annexe B (tableau B.1). Les principales parties prenantes retenues sont le fabricant, l'exploitant minier, les opérateurs systèmes (les personnes qui utilisent le système y compris les opérateurs, les sous-traitants et les personnes chargées de la maintenance), le responsable SST et le responsable maintenance (GMG, 2023).

4.4.4 Zones autonomes et gestion des accès

L'analyse croisée a permis de proposer des actions à mettre en place par l'entreprise pour gérer efficacement les opérations dans les zones autonomes et les accès. Cela est illustré par l'annexe C (tableau C.1). Ces actions s'articulent autour de plusieurs points : délimitation et cartographie des ZFA, contrôle des accès, surveillance et détection, interfaces utilisateurs et communication, procédures sécuritaires et interventions, maintenance et gestion des voies souterraines.

4.4.5 Gestion des données

Selon Burgess-Limerick et al. (2025), la gestion des données générées par les systèmes autonomes (photos, vidéos, audios, etc.) doit prévoir une conservation minimale de deux (2) ans. Cette exigence garantit une traçabilité fiable permettant d'analyser les incidents, d'améliorer les pratiques de sécurité et de répondre aux enquêtes réglementaires.

La confidentialité des images et enregistrements vidéo doit être protégée en tout temps. Toutefois, un accès encadré aux données peut être bénéfique pour les opérateurs. Par exemple, constater des épisodes de micro-sommeil en salle de contrôle peut représenter un puissant levier de sensibilisation, incitant l'opérateur à demander de l'aide ou à signaler de manière proactive son état de vigilance. Les retours d'expérience montrent que les interventions de suivi à long terme suscitent généralement une réaction positive et favorisent une culture de sécurité partagée (Robin Burgess-Limerick et al., 2025).

Dans la salle de contrôle, les systèmes devraient inclure une détection automatisée de la fermeture des yeux et des signes de fatigue (Robin Burgess-Limerick et al., 2025). Ces données, en plus de contribuer à la sécurité opérationnelle en temps réel, s'avèrent précieuses lors d'enquêtes sur des incidents. De même, toutes les actions réalisées dans les zones autonomes doivent être enregistrées de façon systématique afin d'assurer une traçabilité complète des opérations.

Pour garantir un enregistrement continu et fiable des données, la direction de la mine et le fabricant doivent collaborer pour :

- Assurer une couverture complète en communication sans fil (Wi-Fi, LTE privé, 5G industrielle ou autres solutions adaptées),
- Maintenir une bande passante suffisante en tout temps pour supporter le volume élevé de données (flux vidéo, télémétrie, etc.),
- Mettre en place des mécanismes de redondance et de sauvegarde afin d'éviter toute perte de données en cas de défaillance réseau (norme ISO 17757 : 2019),
- Définir des protocoles clairs de gestion, d'archivage et de consultation des données, incluant des mesures de cybersécurité et de protection de la vie privée (GMG, 2023).

Enfin, le GMG (2023) recommande aux exploitations minières d'intégrer ces exigences dans leur plan de gestion des systèmes autonomes, en définissant clairement les responsabilités entre l'exploitant, le fournisseur de systèmes et les opérateurs. Cette approche assure non seulement la conformité réglementaire et technique, mais renforce également la confiance des travailleurs et des parties prenantes dans l'utilisation sécuritaire des technologies autonomes.

4.4.6 Mise en service

Selon le GMG (2023), la mine doit élaborer une stratégie de mise en service systématique, qui couvre :

- le processus et le calendrier de mise en service,
- l'analyse des risques,
- les rôles et responsabilités,
- le plan de test,
- le processus d'approbation formelle et d'acceptation par l'utilisateur.

Deux approches de déploiement sont possibles :

- Flotte complète : la totalité des actifs est mise en service avant la remise en exploitation, afin d'éviter une seconde phase de mise en service.
- Déploiement progressif : une partie de la flotte est déployée d'abord, ce qui permet de valider la performance et la sécurité du système avant le déploiement intégral (GMG, 2023).

Un plan d'exécution du projet doit être préparé et inclure :

- la répartition claire des responsabilités,
- les critères de test et d'acceptation,
- la mise en scène et le calendrier,
- les plans de déploiement détaillés,
- les ressources humaines et matérielles nécessaires (GMG, 2023).

Les tests doivent être définis et validés dès le départ entre l'exploitant et le FEO. Le FEO peut élaborer les critères et protocoles, mais la validation finale appartient à l'exploitant minier.

Les essais pilotes doivent intégrer :

- des mesures de sécurité industrielle,
- une évaluation scientifique et technique rigoureuse,
- une définition claire des objectifs, des responsables, des conditions, des procédures et des mesures de contrôle.

Les résultats des essais pilotes doivent être consignés dans un rapport d'avancement, incluant les problèmes rencontrés et les conclusions (GMG, 2023). Sur cette base, l'exploitant doit ajuster la documentation du projet conformément aux exigences légales.

Enfin, avant le transfert officiel des opérations, tous les processus, procédures et formations doivent être en place, en particulier ceux liés à la sécurité et à la gestion des pannes (GMG, 2023). Toutefois, la norme ISO 17757 : 2019 a élaboré un formulaire (annexe A de la norme) pour vérifier la conformité aux exigences de conception sécuritaire d'un système autonome avant son intégration dans une mine souterraine.

Dans le cadre de cette partie de nos résultats, nous avons élaboré une *liste de contrôle* synthétique résumant les conditions et actions clés à vérifier pour une intégration sécuritaire des véhicules autonomes dans une mine souterraine. Cela est illustré par le tableau 4.4.

Tableau 4.4 Liste de contrôle intégration sécuritaire des véhicules autonomes dans une mine souterraine

Dimensions	Éléments à vérifier	Questions clés	Références
Réglementation	Cartographie des exigences normatives	Les normes applicables (ISO 12100, ISO 17757, CSA M424.0-2022, etc.) ont-elles été identifiées et intégrées au plan de conformité ?	ISO, (2019)
	Conformité légale et réglementaire	L'entreprise a-t-elle analysé la conformité avec la législation locale (CNESST, Code minier, SST) ?	Cette étude
	Registre des parties prenantes réglementaires	Les autorités, syndicats, organismes de normalisation et communautés locales sont-ils identifiés et consultés ?	GMG, (2023)
	Intégration de la conformité dans les procédures	Les procédures opérationnelles (intervention en zone autonome, freinage, communication) respectent-elles les exigences normatives ?	GMG, (2023)
	Homologation et certification	Un processus d'homologation interne et externe est-il prévu avant la mise en service ?	GMG, (2023)
	Veille réglementaire continue	Un mécanisme de veille normative (ISO, CSA, GMG, CNESST) est-il en place et documenté ?	Cette étude
Gestion du changement	Diagnostic initial et planification	Un diagnostic organisationnel préalable a-t-il été effectué avant le déploiement ?	Burgess-Limerick et al. (2025)
	Stratégie de déploiement	La stratégie de déploiement (progressive ou complète) est-elle définie et validée ?	GMG, (2023)
	Appropriation par les travailleurs	Des formations et communications adaptées sont-elles prévues pour assurer l'adhésion du personnel ?	Burgess-Limerick et al. (2025)
	Suivi et évaluation du changement	Des indicateurs de suivi du changement (acceptation, performance, incidents) sont-ils mis en place ?	GMG, (2023)
Responsabilités des parties prenantes	Identification des acteurs	Le fabricant, l'exploitant, les opérateurs, les sous-traitants, le responsable SST et maintenance sont-ils clairement identifiés ?	GMG, (2023)
	Répartition des rôles	Existe-t-il une matrice RACI (Responsable, Approbateur, Consulté, Informé) définissant les rôles ?	GMG, (2023)
	Communication inter-parties	Les canaux de communication entre les parties prenantes sont-ils établis et documentés ?	Cette étude
	Suivi des engagements	Un mécanisme de suivi des responsabilités et engagements est-il prévu (réunions, rapports, audits) ?	(GMG, 2023)

Tableau 4.4 Liste de contrôle intégration sécuritaire des véhicules autonomes dans une mine souterraine (suite et fin)

Dimensions	Éléments à vérifier	Questions clés	Références
Zones autonomes et gestion des accès	Délimitation et cartographie	Les zones de fonctionnement autonome (ZFA) sont-elles clairement définies et signalées ?	(GMG, 2023)
	Contrôle et surveillance des accès	Des systèmes de contrôle d'accès (badges, barrières, géo repérage) sont-ils installés ?	GMG (2023)
	Détection et prévention des intrusions	Des capteurs et systèmes de surveillance temps réel sont-ils opérationnels ?	GMG (2023)
	Communication et alertes	Les opérateurs disposent-ils d'interfaces claires et de signaux d'avertissement visuels et sonores ?	Burgess-Limerick et al. (2025)
	Maintenance et sécurité des voies	Les procédures de maintenance tiennent-elles compte des risques liés à la cohabitation avec les VA ?	GMG, (2023)
Gestion des données	Collecte et stockage	Les flux de données (vidéo, télémétrie, audio) sont-ils enregistrés de manière continue et redondante ?	GMG, (2023)
	Conservation et traçabilité	Les données sont-elles conservées au moins 2 ans conformément aux exigences ?	Burgess-Limerick et al. (2025)
	Cybersécurité et vie privée	Des protocoles de sécurité (cryptage, accès restreint) sont-ils appliqués aux données sensibles ?	GMG, (2023)
	Analyse et retour d'expérience	Les données sont-elles utilisées pour la prévention, l'analyse d'incidents et l'amélioration continue ?	Burgess-Limerick et al. (2025)
	Infrastructure réseau	La couverture réseau (Wi-Fi, LTE, 5G industrielle) est-elle suffisante et fiable pour la transmission des données ?	GMG, (2023)
Mise en service	Stratégie de déploiement	L'entreprise a-t-elle choisi entre un déploiement complet ou progressif, selon un plan validé ?	GMG, (2023)
	Plan de test et validation	Les critères de test (sécurité, performance, acceptation utilisateur) sont-ils clairement définis ?	GMG, (2023)
	Processus d'approbation	Le processus d'approbation interne et externe est-il documenté et suivi ?	GMG, (2023)
	Rapports et documentation	Les essais pilotes donnent-ils lieu à des rapports complets incluant les incidents et recommandations ?	GMG, (2023)
	Formation avant exploitation	Le personnel est-il formé aux nouveaux processus et à la gestion des pannes avant le transfert d'exploitation ?	Burgess-Limerick et al. (2025)

Une fois l'intégration effectuée, il demeure indispensable de disposer d'une méthode rigoureuse permettant d'évaluer les risques associés à ces véhicules.

4.5 Proposition de méthode intégrée de gestion des risques

L'objectif de notre méthode est d'évaluer et de réduire les risques liés à l'utilisation des véhicules autonomes en milieu souterrain. Notre méthode d'évaluation intègre les principes généraux de la sécurité machine tels que définis dans la norme ISO 12100 : 2010 (identification des dangers, estimation et évaluation des risques, mesures de réduction) et les exigences spécifiques aux systèmes autonomes et semi-autonomes dans l'exploitation minière définis par la norme ISO 17757 : 2019 (considérations techniques, humaines, organisationnelles et fonctionnelles propres à l'autonomie). La combinaison de ces deux référentiels normatifs a permis de concevoir une méthode intégrée d'évaluation des risques illustrée par la figure 4.3. La méthode proposée doit être considérée comme une première étape dans un processus plus large de développement méthodologique.

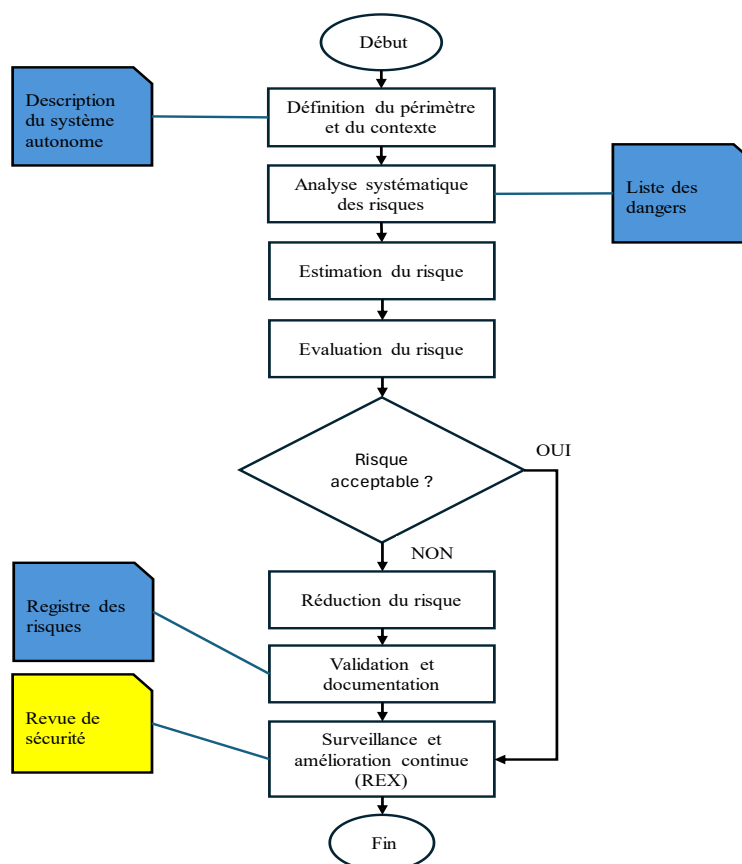


Figure 4.3 Méthode d'évaluation des risques liés aux véhicules autonomes en milieu souterrain

REX est l'abréviation du terme retour d'expériences.

4.6 Démarche de la méthode

Étape 1 : Définition du périmètre et du contexte

- Description du système autonome
 - Type de véhicule : camion, LHD, bulldozer, foreuse, etc.
 - Niveau d'autonomie : téléopéré, autonome, semi-autonome
 - Environnement : mine souterraine, zones mixtes (humains/machines), zones d'exclusion, ventilation, visibilité, communication, état du réseau routier, etc.
 - Interfaces avec d'autres interfaces : passerelles de communication, capteurs, logiciels de supervision, systèmes d'arrêt d'urgence, etc.
- Données d'entrée
 - Spécifications du constructeur : limites d'utilisation du système, consignes de sécurité, etc.
 - Scénarios opérationnels : missions, routes, interactions possibles, etc.
 - Données de retour d'expérience
 - Structure organisationnelle : rôles, supervision, maintenance, formation

Étape 2 : Analyse systématique des risques

Nous recommandons l'utilisation de l'outil d'analyse préliminaire des risques (APR) pour l'identification exhaustive des dangers classiques (mécaniques, électriques, physiques, etc.). La norme ISO 17757 présente à son annexe A, une liste des dangers émergents associés aux véhicules autonomes. De plus, un brainstorming interdisciplinaire permet également de recenser tous les dangers. Le tableau 4.5 propose quelques dangers propres aux véhicules autonomes.

Tableau 4.5 Typologie des dangers

Typologie des dangers	Exemples adaptés aux véhicules autonomes
Mécaniques	Collision, renversement, écrasement
Électriques/électroniques	Défaillance du système de freinage, court-circuit, perte de communication
Logiciels/contrôle	Mauvaise détection d'obstacles, bug dans la logique décisionnelle (erreur de perception)
Humains/ergonomiques	Perte de conscience de la situation, erreur de mode, erreur de saisie
Organisationnels	Défaut de procédures, confusion des responsabilités, maintenance inadéquate
Environnementaux	Poussière, brouillard, humidité, bruit
Cybersécurité	Intrusion, perte d'intégrité des données de commande

La suite de l'analyse respecte la démarche de l'ISO 12100 notamment l'identification des situations dangereuses, les événements dangereux et les dommages possibles.

Étape 3 : Estimation du risque

Notre estimation de risques épouse celle de la norme ISO 12100 à l'exception du critère possibilité d'évitement (P) qui sera remplacé par un critère adapté aux systèmes autonomes notamment la fonction de détection. Ainsi, notre estimation combine gravité, fréquence/exposition et probabilité d'occurrence/ de défaillance. Le tableau 4.6 présente nos critères d'estimation de risque :

Tableau 4.6 Critères d'estimation de risques

Critère	Description	Echelle proposée
Gravité du dommage (G)	Conséquences d'un événement dangereux	G1 : Légère, G2 : Grave
Fréquence d'exposition au phénomène dangereux (F)	Fréquence de présence humaine dans la zone ou d'occurrence du scénario	F1 : Rare, F2 : Fréquente,
Probabilité d'occurrence de l'évènement dangereux (O)	Probabilité qu'une défaillance mène à un évènement dangereux	O1 : Très faible, O2 : Faible, O3 : élevée
Défectabilité / maîtrise de la défaillance (D) (spécifique à l' ISO 17757) ou possibilité d'évitement (D)	Capacité du système à détecter et atténuer la défaillance avant l'incident	D1 : Détection rapide, D2 : Détection partielle, D3 : Détection tardive ou inexistante

- Justification du choix des paramètres d'estimation du risque

Les paramètres d'estimation du risque par l'outil de la CSST-IRSST en rapport avec la sécurité des machines fixes et mobiles (ISO 12100) sont : la gravité du dommage (G), la fréquence d'exposition au phénomène dangereux (F), la probabilité d'occurrence de l'évènement dangereux (O) et la possibilité d'évitement du dommage (P).

Gravité (G) : reste indispensable, l'impact (blessure, dommages, décès) reste un point important pour prioriser le risque

Fréquence d'exposition (F) : reste important car même un évènement grave est moins critique s'il est très rare (exemple : zones à accès restreint pour le personnel et les véhicules manuels)

Probabilité d'occurrence de l'évènement dangereux (O) : toujours utile pour estimer la probabilité qu'une condition dangereuse se matérialise (pannes événements aléatoires, conditions opérationnelles)

Ces trois paramètres ont été conservés dans notre méthode mais leur interprétation change légèrement pour les systèmes autonomes (exemple : la probabilité intègre également des défaillances logicielles, des erreurs de perception, des pannes de communication ou réseau, etc.).

De plus, le critère gravité du dommage distingue deux niveaux d'évaluation :

- Les dommages SST (blessures, maladie professionnelle, décès, dommages matériels), en conformité avec ISO 12100, centrés sur les atteintes à la santé et la sécurité ;
- Et les conséquences systémiques, qui incluent les impacts organisationnels, techniques et économiques (perte de production, arrêt de la flotte, perte de confiance dans le système autonome, etc.).

Par ailleurs, dans la norme ISO 12100, le critère de possibilité d'évitement repose sur l'hypothèse qu'un opérateur humain est en mesure de percevoir un danger et de réagir à temps afin d'éviter ou de limiter un dommage, par exemple en retirant une partie du corps exposée ou en déclenchant un arrêt d'urgence. Or, dans le contexte des mines souterraines recourant à des véhicules autonomes, cette hypothèse est souvent remise en question. En effet, lors d'opérations telles que le chargement, le transport ou le déchargement des minerais, les opérateurs peuvent ne pas être présents à proximité immédiate des véhicules.

Dans ces situations, les événements dangereux résultent majoritairement de défaillances internes au système, notamment d'origine logicielle, liées aux capteurs ou aux communications, et ne peuvent donc ni être anticipés ni évités par une intervention humaine. Afin de répondre à cette limite, la norme ISO 17757, dédiée à la sécurité des systèmes autonomes et semi-autonomes, adopte une approche centrée sur la capacité intrinsèque du système à détecter et maîtriser ses propres défaillances. Le critère de détectabilité/maîtrise de la défaillance (D) permet ainsi d'évaluer la performance du système à identifier une anomalie et à mettre en œuvre automatiquement une action de sécurité appropriée avant qu'un dommage ne survienne.

Ce paramètre repose sur des indicateurs techniques tels que :

- la couverture diagnostique (% de défaillances détectées) : proportion de défaillances détectées automatiquement par le système sur le total des modes de défaillance possibles;
- la latence de détection : temps écoulé entre la survenue de la défaillance et sa détection par le système;
- la capacité de réponse (arrêt sûr, mode dégradé, transfert au téléopérateur) : c'est la capacité du véhicule autonome à réagir correctement et en toute sécurité quand il détecte un problème;
- la redondance et robustesse des mécanismes de contrôle : le contrôle est sécurisé et stable, même si une partie du système ne fonctionne plus parfaitement;
- et le taux d'erreurs de détection (faux négatifs) : il s'agit du nombre de fois où le système ne détecte pas un problème alors qu'il existe vraiment. On l'exprime en pourcentage.

Les critères quantitatifs de ces indicateurs techniques doivent être définis en fonction du niveau de détectabilité de la défaillance (D1, D2 ou D3) et du retour d'expérience des fabricants d'équipements d'origines (FEO) et de l'exploitant. Nous n'allons pas définir ces critères dans le cadre de ce mémoire, ce qui représente toutefois une limite à notre travail.

Nous avons retenu trois niveaux de détectabilité :

- **D1** : détection rapide et maîtrise automatique efficace (faible contribution au risque) — diagnostics couvrant la quasi-totalité des modes critiques, délai de détection court, réponse automatique sûre (arrêt contrôlé / mode dégradé), tests réguliers ; Exemple : perte partielle de perception (LiDAR obscurci) détectée instantanément par le système de surveillance, véhicule se met en mode lent + supervision humaine ;
- **D2** : détection partielle ou dépendante d'une action humaine à distance (contribution moyenne) — détection de la plupart des défaillances importantes, mais délais ou actions de maîtrise partiellement dépendantes d'une intervention humaine à distance ; redondance limitée ; Exemple : Un capteur de proximité tombe en panne partielle, ce qui réduit la précision de détection d'obstacles. Le système central remarque une incohérence dans les données après quelques secondes et envoie une alerte au poste de contrôle. Le téléopérateur intervient à distance pour ralentir ou arrêter le véhicule. On peut conclure que la défaillance est détectée avec retard et maîtrisée grâce à une action humaine, pas entièrement de façon automatique.

- **D3** : détection tardive ou inexistante, sans réponse sûre (forte contribution au risque) — Défaillances non détectées ou détectées tardivement ; pas de réponse automatique fiable ; requiert une action humaine sur site pour maîtriser. Exemple : Le véhicule reçoit par erreur une instruction de trajet faussée à cause d'un problème de transmission (bug logiciel, interférence, erreur de transmission, etc.). Comme le système de surveillance ne détecte pas cette erreur, le véhicule suit une mauvaise trajectoire

Ainsi, le quatrième critère d'estimation du risque à utiliser dépend du scénario :

- pour l'exploitation autonome sans présence humaine, la détectabilité est prioritaire ;
- pour l'exploitation autonome avec présence humaine (opérations de maintenance, intervention dans la zone autonome, etc.), la possibilité d'évitement humaine est utilisée pour l'estimation du risque.

- Calcul de l'indice du risque

Notre indice de risque est donné par la formule suivante :

$$\text{Indice de risque } R = G * F * O * D$$

Plus l'indice de risque est grand, plus le risque est important. Nous avons proposé cinq niveaux de risque tels que définis dans le tableau 4.7. Ces niveaux de risques résultent de la combinaison des différents paramètres de l'estimation du risque. L'annexe E va illustrer la matrice de combinaison de ces paramètres.

Tableau 4.7 Matrice de criticité

Niveau de risque (R)	Signification	Actions à mettre en œuvre
1 : Très faible	Risque négligeable	Surveillance passive, consigner comme risque résiduel
2 : Faible	Risque acceptable	Vérifications périodiques ; actions d'amélioration non urgentes
3 : Modéré	Risque tolérable sous contrôle	Mesures préventives recommandées (tests, formation, inspection)

Tableau 4.7 Matrice de criticité (suite et fin)

Niveau de risque (R)	Signification	Actions à mettre en œuvre
4 : Élevé	Risque inacceptable	Réduction obligatoire (mesures techniques, redondance, limitation des accès)
5 : Critique	Risque inacceptable majeur	Scénario interdit tant que non corrigé ; nécessité de re-conception ou d'arrêt de fonctionnement

Étape 4 : Évaluation du risque

Cette étape vise à comparer le niveau estimé de risque avec les critères d'acceptabilité définis par la politique SST de l'entreprise, les exigences réglementaires (MSHA, CNESST, ISO 12100, ISO 17757, ISO 13849-1, etc.). Chaque niveau de risque peut être jugé négligeable, acceptable, tolérable sous contrôle, inacceptable ou inacceptable majeur.

Étape 5 : Réduction du risque

Dans le cadre de cette méthode, les mesures de réduction du risque (MRR) doivent être mise en place lorsque le niveau de risque est supérieur ou égal à 3. À cet effet, nous avons conservé les trois principales mesures de hiérarchisation des risques selon la norme ISO 12100 : 2010 :

- Prévention intrinsèque : réduire le risque dès la conception du véhicule et du système autonome. Exemple de mesures : limitation de vitesse automatique, freinage redondant, etc.
- Mesures techniques de protection : réduire le risque résiduel par des dispositifs techniques. Exemples de mesures : barrières immatérielles comme le LiDAR, fonctions d'arrêt d'urgence, etc.
- Mesures organisationnelles : réduire le risque restant par la gestion des personnes, la formation et la supervision. Exemples de mesures : formation, sensibilisation, port obligatoire des EPI, inspections régulières, etc.

Sur la base du plan d'action SST dans les mines souterraines lancé en 1995 par la CNESST (Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail), des statistiques d'accidents dans le secteur minier au Québec en 2023 (30% des accidents provenant des mines

souterraines) et de notre retour d'expérience sur la gestion des risques en milieu de travail, chaque mesure de réduction de risques (MRR) devra être réévaluée selon la méthode (retour à l'étape 3) jusqu'à ce que le niveau de risque soit inférieur ou égal à 2, tout en veillant que cette MRR n'entraîne pas de nouveaux risques.

Étape 6 : Validation et documentation

Cette étape représente la synthèse de notre processus de gestion des risques. À la fin de du processus, l'entreprise doit produire dans le style qui la convient (tableau, etc.), un registre de risques complet intégrant les différents scénarios d'accidents, les dangers, les causes, conséquences, l'estimation du risque, mesures prises, etc.). Elle doit également effectuer des audits de contrôle des actions mis en place.

Étape 7 : Surveillance et amélioration continue

La norme ISO 17757 : 2019 insiste sur l'importance de cette étape. Elle fournit à cet effet des recommandations à suivre par les entreprises minières :

- Réévaluer le programme SST après tout changement de configuration, mise à jour logicielle, incident, ou modification de site ;
- Suivre les indicateurs de performance de sécurité (taux d'événements, alarmes, interventions humaines, quasi-accidents) ;
- Intégrer les retours du personnel dans une boucle d'amélioration continue (International Organization for Standardization, 2019).

4.7 Application de la méthode sur deux scénarios concrets

Cette étape a consisté à présenter deux scénarios réels (concernant les facteurs technologiques et humains) survenus dans des mines à ciel ouvert en Australie-Occidentale. En effet, nous n'avons pas trouvé des cas documentés d'incidents ou accidents dans les mines souterraines autonomes. L'objectif était de valider la méthode d'évaluation des risques développée précédemment à ces cas réels, afin d'en démontrer la pertinence, de valider sa capacité à identifier les défaillances potentielles et d'illustrer son importance dans la prise de décision en matière de maîtrise des risques liés aux véhicules autonomes.

Scénario 1 : Collision entre un camion de transport autonome (CTA) et un LHD manuel lors d'une opération de chargement de minerais

Description de l'évènement : Le camion de transport autonome en marche arrière s'est arrêté lorsque les communications ont été coupées. Lorsque la couverture Wi-Fi a été rétabli, le camion a continué la marche arrière et est entré en collision avec le LHD manuel (Burgess-Limerick et al., 2025). Résumé de l'incident SA-389-29984, 02/11/2019

Scénario 2 : Erreur de mode par l'opérateur à bord du CTA

Description de l'évènement : Un camion minier autonome circulant sur la voie de transport, avec un chauffeur de contrôle à bord, est monté sur un andain, c'est-à-dire une butte de matériau servant de bordure de sécurité le long de la piste. L'incident est survenu alors que le chauffeur procédait à une opération d'étalonnage, durant laquelle le véhicule a été placé par inadvertance en mode manuel environ quinze secondes avant de franchir l'andain (Burgess-Limerick et al., 2025). Résumé de l'incident SA-MG-453-16969, 19/06/2014)

Les résultats de l'évaluation des risques de ces deux scénarios seront présentés respectivement dans les tableaux 4.8 et 4.10, tandis que leurs mesures d'hierarchisation seront présentés respectivement dans les tableaux 4.9 et 4.11.

Tableau 4.8 Évaluation des risques - scénario 1

Tâche/ activité	Composantes du risque				Estimation de l'indice de risque				
Description	Phénomène dangereux	Situation dangereuse	Évènement dangereux	Dommages possibles	Gravité (G1/G2)	Fréquence d'exposi- tion (F1/F2)	Probabilité d'occur- rence (O1/O2/O3)	Délectabi- lité (D1/D2/D3)	Indice de risque (1 à 5)
Opération de chargement d'un CTA par une chargeuse manuelle	Perte de communica- tion entre le CTA et la salle de contrôle	Reprise de déplacement du CTA en zone mixte sans confirmation de sé- curité	Perte de contrôle du CTA par l'opérateur à distance	Collision entre les deux engins Blessures graves ou mortelles de l'opérateur du LHD manuel Arrêt de la flotte auto- nome Perte de productivité Perte de confiance dans le système autonome	2	2	2	3	5
		Zone de recul à visibilité réduite	Défaillance du sys- tème de détection d'obstacles arrière (capteurs défaillants)	Collision entre les deux engins Blessures graves ou mortelles de l'opérateur du LHD manuel Arrêt de production	2	2	2	3	5

Justification du choix des indices de risque

Gravité du dommage (G2)

La gravité est évaluée au niveau maximal (G2), car les scénarios analysés peuvent entraîner des blessures graves, voire mortelles, pour l'opérateur de la chargeuse manuelle en cas de collision entre les deux engins. Conformément aux principes de l'ISO 12100, toute situation pouvant conduire à des atteintes graves à la santé humaine justifie une gravité élevée. À ces conséquences SST s'ajoutent des impacts systémiques importants, tels que l'arrêt de la flotte autonome, la perte de productivité et la perte de confiance dans le système autonome, ce qui renforce le caractère critique du risque.

Fréquence d'exposition (F2)

La fréquence d'exposition est jugée élevée (F2), car l'opération de chargement constitue une activité répétitive et centrale dans les opérations minières souterraines. La coactivité entre un engin autonome et un engin manuel, notamment en zone de recul à visibilité réduite, expose régulièrement les opérateurs à la situation dangereuse, en particulier lors des phases de manœuvre et de repositionnement.

Probabilité d'occurrence de l'événement dangereux (O2)

La probabilité d'occurrence est estimée comme moyenne (O2). Bien que les systèmes de communication et de détection soient conçus avec des niveaux de fiabilité élevés, des défaillances restent possibles dans un environnement souterrain contraignant (poussière, humidité, interférences, usure des capteurs). La perte de communication avec la salle de contrôle ou la défaillance des capteurs arrière ne sont pas des événements fréquents, mais plausibles et déjà documentés dans la littérature et les retours d'expérience industriels.

Détectabilité (D3)

La détectabilité est considérée faible (D3), car certaines défaillances peuvent ne pas être immédiatement perçues par le système. La reprise de déplacement du CTA sans confirmation explicite de sécurité, ou une défaillance du système de détection d'obstacles en zone de recul, peut survenir sans alerte claire, laissant peu de temps pour une réaction corrective. En environnement souterrain, la visibilité réduite et la dépendance aux systèmes automatisés accentuent cette difficulté de détection.

Indice de risque global (5)

La combinaison d'une gravité élevée, d'une exposition fréquente, d'une probabilité d'occurrence non négligeable et d'une faible détectabilité conduit à un indice de risque maximal (5). Ce niveau de risque (étant supérieur ou égal à 3) justifie la mise en œuvre de mesures de prévention renforcées telles que illustrées par le tableau 4.9.

Tableau 4.9 Mesures de réduction du risque – scénario 1

Hierarchisation des mesures de réduction du risque	Mesures de prévention
Prévention intrinsèque	Faire la cartographie des zones de signal faible et mettre en place une liaison secondaire (fibre optique, LTE, etc.) pour maintenir la communication Intégrer dans le système autonome une fonction empêchant toute reprise de mouvement immédiate d'un véhicule autonome après reconnexion, sauf validation de sécurité par l'opérateur à distance Intégrer dans le système autonome une fonction permettant au véhicule de prendre une décision de sécurité sans dépendre du réseau Réduire automatiquement la vitesse de tout engin autonome dans les zones à risque de perte de communication Installer deux capteurs de différentes technologies pour la zone arrière (radar + LiDAR + ultrasons) afin d'assurer une redondance dans le fonctionnement
Mesures techniques de protection	Mettre en place des alertes préventives automatiques (sans nuisance) dès la dégradation de la communication. Définir un seuil minimal du débit de communication à partir duquel on arrête l'opération en cours Concevoir des niveaux différents d'exploitation (butées, différences de niveau) entre les véhicules manuels et autonomes sur les points de chargement pour éviter des collisions en cas de perte de contrôle Assurer un contrôle régulier de la stabilité du réseau
Mesures Organisationnelles	Interdire l'utilisation des véhicules manuels dans les zones de risque de perte de signal Utiliser automatiquement les indicateurs visuels de tout engin autonome en mode d'approche (vert clignotant pour le mode manuel et bleu clignotant pour le mode autonome, recommandation ISO 17757) Contrôler quotidiennement la conformité des capteurs avant et arrière Assurer une maintenance régulière des capteurs et leur mise à rebut après un certain temps de fonctionnement à définir Sensibiliser le personnel sur les défaillances probables de fonctionnement d'un véhicule autonome après reconnexion

Tableau 4.10 Évaluation des risques – scénario 2

Tâche/activité	Composantes du risque				Estimation de l'indice de risque				
Description	Phénomène dangereux	Situation dangereuse	Evènement dangereux	Dommages possibles	Gravité (G1/G2)	Fréquence d'exposition (F1/F2)	Probabilité d'occurrence (O1/O2/O3)	DéTECTABILITÉ (D1/D2/D3)	Indice de risque (1 à 5)
Opération d'étalonnage avec un chauffeur de contrôle à bord du CTA	Erreur de mode (mode autonome à manuel)	Le chauffeur de contrôle croit que le véhicule est toujours en mode autonome	Perte de trajectoire ou déviation de l'itinéraire planifié	Collision avec un autre véhicule, un mur Ecrasement d'un piéton se trouvant à proximité Dommages matériels du CTA Blessures graves ou mortelles du chauffeur de contrôle	2	2	2	2	4
	Perte de communication entre véhicule et salle de contrôle	Confiance excessive dans le système autonome pendant l'étalonnage entraînant une diminution de vigilance	Déviation de trajectoire initiale	Collision avec un autre véhicule, un mur Ecrasement d'un piéton se trouvant dans la zone Dommages matériels du CTA Blessures graves ou mortelles du chauffeur de contrôle	2	2	2	2	4

Justification du choix des indices de risque

Gravité du dommage ($G = 2$)

Les scénarios analysés peuvent entraîner des conséquences graves, notamment des blessures graves ou mortelles du chauffeur de contrôle en cas de collision, l'écrasement éventuel d'un piéton se trouvant à proximité, ainsi que des dommages matériels importants au CTA et aux infrastructures. Conformément aux critères de gravité retenus, la présence humaine à bord du véhicule et la possibilité d'accidents à conséquences sévères justifient un niveau de gravité élevé ($G2$).

Fréquence d'exposition ($F = 2$)

Les opérations d'étalonnage sont réalisées de manière régulière, notamment lors de la mise en service, des mises à jour du système, des ajustements de capteurs ou après des interventions de maintenance. Durant ces phases, le chauffeur est exposé de façon répétée à la situation dangereuse, ce qui justifie une fréquence d'exposition élevée ($F2$).

Probabilité d'occurrence ($O = 2$)

Les erreurs de mode (confusion entre mode autonome et manuel) et les pertes de communication sont des événements connus dans les systèmes autonomes complexes, en particulier en milieu souterrain où les conditions environnementales (poussière, interférences, limitations de connectivité) peuvent affecter la fiabilité des systèmes. Bien que des dispositifs techniques de sécurité existent, ces événements restent plausibles sans être systématiques, ce qui conduit à retenir une probabilité d'occurrence moyenne ($O2$).

Détectabilité ($D = 2$)

Dans les situations étudiées, les défaillances ne sont pas toujours immédiatement détectables par le système. Une erreur de mode ou une perte de communication peut ne pas être clairement signalée, surtout en cas de confiance excessive dans le système autonome. Toutefois, la présence du chauffeur à bord permet une certaine capacité de perception et d'intervention, ce qui justifie un niveau intermédiaire de détectabilité ($D2$).

Indice de risque global ($IR = 4$)

La combinaison d'une gravité élevée, d'une exposition fréquente, d'une probabilité d'occurrence moyenne et d'une détectabilité intermédiaire conduit à un indice de risque élevé ($IR = 4$). Ce niveau

de risque nécessite la mise en place de mesures de prévention renforcées telles que illustrées par le tableau 4.11.

Tableau 4.11 Mesures de réduction du risque – scénario 2

Hierarchisation des mesures de réduction du risque	Mesures de prévention
Prévention intrinsèque	Intégrer dans le système autonome (écran CTA et écran salle de commande) une fonction empêchant le passage de mode sans confirmation double (exemple : bouton + validation sur écran). Par exemple : Voulez-vous vraiment passer au mode manuel ? Mettre en place des indicateurs lumineux/sonores distincts selon le mode (bleu clignotant pour le mode autonome et vert clignotant pour le mode manuel, recommandation ISO 17757) Faire la cartographie des zones de signal faible et mettre en place une liaison secondaire (fibre optique, LTE, etc.) pour maintenir la communication
Mesures techniques de protection	Mettre en place un système d'arrêt automatique sûr en cas de déviation de l'itinéraire prévu du CTA Effectuer la surveillance permanente des états de commande des véhicules autonomes en opération Assurer un contrôle régulier de la stabilité du réseau
Mesures organisationnelles	Former le personnel à la gestion des transitions de mode Élaborer et former le personnel à la procédure d'étalonnage à bord d'un véhicule autonome Sensibiliser le personnel à l'importance de la vigilance pendant l'opération d'étalonnage à bord d'un CTA Faire un audit périodique des événements de transition de mode afin d'identifier et d'analyser les causes des basculements involontaires

CHAPITRE 5 DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

Cette section vise à interpréter les principaux résultats obtenus et à les situer par rapport aux travaux existants.

5.1 Rappel des principaux résultats

Les résultats de l'étude documentaire mettent en évidence que l'intégration des véhicules autonomes en milieu souterrain soulève à la fois de nouveaux enjeux SST et des risques émergents propres à la nature complexe des systèmes autonomes. Cette étude a permis d'identifier plusieurs catégories de risques engendrés par l'introduction des véhicules autonomes dans les opérations minières.

L'analyse croisée des travaux du GMG et ceux de Burgess-Limerick a permis de ressortir six dimensions essentielles à prendre en compte lors de l'intégration des véhicules autonomes dans des mines souterraines. Ces dimensions couvrent les aspects techniques, organisationnels, humains et réglementaires.

Par ailleurs, le développement de la méthode combinée ISO 12100 et ISO 17757 et son application à deux scénarios réels en milieu souterrain a permis de montrer la pertinence de cette approche méthodologique pour mieux gérer les risques associés aux systèmes complexes comme les véhicules autonomes.

Ces résultats fournissent une compréhension approfondie des typologies de risque liées aux véhicules autonomes, des dimensions essentielles pour une intégration réussie ainsi qu'une méthodologie de gestion des risques adaptée à cette technologie complexe.

5.2 Interprétation des résultats

5.2.1 Risques émergents SST

Les résultats ont permis de relever des risques physiques, technologiques, psychosociaux et cognitifs associés aux VA. Par ailleurs, on note également un impact sur les rôles du personnel et particulièrement des conducteurs d'engins qui seront désormais des opérateurs à distance installés dans une salle de contrôle. L'étude documentaire montre également que l'éloignement du terrain peut entraîner une diminution de la conscience situationnelle, ce qui augmente le risque de

décisions inappropriées ou d'actions involontaires susceptibles de provoquer des accidents. Aussi, les résultats mettent en évidence l'importance d'une formation adéquate du personnel pour mieux appréhender la technologie des véhicules autonomes qui intègre plusieurs disciplines notamment la robotique, les systèmes d'information, l'ergonomie cognitive, etc. L'identification de ces risques démontre donc la nécessité de comprendre les modes de défaillances liés à ces véhicules afin de réaliser une intégration et une exploitation sûre et durable de ceux-ci.

5.2.2 Démarche d'intégration

La démarche d'intégration des véhicules autonomes, articulée autour de six dimensions complémentaires, met en évidence les facteurs clés d'une implantation sécuritaire et durable en milieu souterrain. La démarche indique que la conformité aux normes ISO précitées (ISO 12100, ISO 17757 et autres) constitue la base de toute intégration sécuritaire des véhicules autonomes. Par ailleurs, les acteurs de l'intégration devraient adapter ces référentiels au contexte local (normes nationales, organismes locaux, etc.) et aux politiques internes propres à chaque mine souterraine.

Elle offre également un cadre structuré pour une transition sécuritaire et progressive vers l'autonomie minière. Le plan de gestion du changement repose sur six volets complémentaires : diagnostic initial, planification, engagement des parties prenantes, appropriation du changement, amélioration continue et développement des compétences. Cette approche favorise à la fois la sécurité, la productivité et l'adhésion du personnel. La démarche montre que la réussite de l'intégration ne dépend pas seulement de la technologie, mais surtout de la maturité organisationnelle et de la gestion du changement.

La démarche révèle aussi que la communication permanente entre les FEO et l'exploitant minier contribue à limiter la résistance du personnel au changement et à maintenir une confiance envers l'autonomie. De plus, la définition des responsabilités des parties prenantes permet de couvrir tous les angles d'action pour une intégration sûre.

La cartographie des zones autonomes et la gestion accès sont considérés comme des éléments critiques pour prévenir les intrusions et les collisions. Les résultats de l'étude documentaire confirment que la sécurité en milieu souterrain dépend la définition des frontières physiques des zones d'exclusion des VA et des zones d'interaction avec les véhicules manuels et les travailleurs. De plus, la gestion de l'accès des zones peut se faire par des barrières matériels et immatériels, ainsi que par des protocoles d'autorisation d'accès comme des cartes RFID, des badges

électroniques, etc. La maîtrise de cette dimension permet de réduire les situations dangereuses liées aux interactions homme-véhicule autonome-véhicule manuel, particulièrement lors des opérations de ravitaillement, de maintenance ou d'intervention d'urgence.

L'analyse a montré également que la sécurité opérationnelle des véhicules autonomes est indissociable de la sécurité informationnelle. Les pertes de communication, les brouillages de données et les failles logicielles identifiées dans l'étude démontre que la cybersécurité influence directement le risque physique. Ainsi, la gestion rigoureuse des données (intégrité, conservation, confidentialité et disponibilité) et la redondance des capteurs sont essentielles pour sensibiliser les opérateurs sur les épisodes de micro-sommeil en salle de contrôle et assurer l'intégrité des données en cas de panne de communication. Cette dimension représente un nouvel enjeu de la sécurité minière et constitue un facteur clé de la fiabilité globale des systèmes autonomes.

Enfin, la dernière dimension met en lumière le caractère évolutif de l'intégration des systèmes autonomes. Les résultats indiquent qu'une mise en service progressive, appuyée par des essais contrôlés, des audits de performance et des boucles de rétroaction, permet de réduire les incertitudes et d'ajuster les paramètres de sécurité avant l'exploitation complète. La démarche reste ainsi alignée sur les exigences normatives et les réalités du terrain.

5.2.3 Méthode intégrée de gestion des risques

La méthode intégrée de gestion des risques proposée combine les principes des normes ISO 12100 et ISO 17757 afin d'offrir une approche systémique et adaptée aux véhicules autonomes en milieu souterrain. Elle prend en compte à la fois les dimensions techniques, humaines et organisationnelles, tout en introduisant le critère de détectabilité/maîtrise de la défaillance, plus pertinent que la possibilité d'évitement dans les contextes autonomes. La matrice de risque élaborée repose sur quatre critères d'estimation du risque (gravité du dommage, fréquence d'exposition au phénomène dangereux, probabilité d'occurrence de l'évènement dangereux et détectabilité/maîtrise de la défaillance) et définit cinq niveaux de risque allant du niveau 1 (risque négligeable) au niveau 5 (risque inacceptable majeur). Cette classification permet une priorisation claire des scénarios dangereux et oriente le choix des mesures de maîtrise de risque selon leur importance. En intégrant cette échelle avec la hiérarchisation ISO 12100 (prévention intrinsèque, mesures techniques de protection, mesures organisationnelles), la méthode devient ainsi un outil

pratique et d'aide à la décision adapté pour la gestion efficace des risques associés à ces véhicules autonomes en contexte souterrain.

De plus, l'application de la méthode combinée ISO 12100 et ISO 17757 à deux scénarios observés dans les mines souterraines en Australie-Occidentale a permis d'évaluer la pertinence du cadre méthodologique proposé.

Le scénario de perte de communication a notamment révélé que, même si le système exécute un arrêt automatique à la coupure du signal, la reprise non contrôlée de la trajectoire à la reconnexion peut générer un mouvement imprévisible, comme observé dans un rapport d'incident en Australie-Occidentale. Cela illustre l'importance de mécanismes de synchronisation et de validation des états avant la reprise des opérations.

Enfin, le passage non confirmé en mode manuel a montré un risque important lié à l'ambiguïté de commande. La confusion sur le statut du mode actif peut entraîner une manœuvre involontaire, comme le franchissement d'un andain observé dans un incident réel ou même la collision d'une personne à proximité.

5.3 Comparaison des résultats avec d'autres approches de la littérature

L'étude documentaire réalisée dans ce mémoire confirme les constats établis dans la littérature scientifique sur les véhicules autonomes en milieu minier. Les travaux de Burgess-Limerick et al., et les directives du GMG identifient les principaux défis liés à l'autonomie : la fiabilité des communications, les limites des systèmes de perception, les cyberattaques ainsi que les facteurs humains tels que la perte de conscience situationnelle, les erreurs de mode ou de saisie, etc. Ces études convergent avec les résultats de cette recherche, qui mettent également en évidence la complexité croissante des risques technologiques et organisationnels. Toutefois, ce mémoire se distingue par une catégorisation élargie des risques physiques, technologiques, psychosociaux et cognitifs, offrant une lecture approfondie et mieux adaptée au contexte souterrain, souvent sous-représenté dans la littérature et majoritairement centrée sur les mines à ciel ouvert. Ainsi, cette approche complète les cadres proposés par le GMG (2023), Burgess-Limerick (2025) et d'autres travaux cités dans la littérature en introduisant une typologie opérationnelle et contextualisée des risques, contribuant à une compréhension plus intégrée et globale des enjeux de sécurité dans les mines souterraines mobiles autonomes.

Par ailleurs, notre démarche d'intégration s'aligne avec les recommandations du GMG, les travaux de Burgess-Limerick et les retours d'expérience du cas documenté d'intégration des chargeuses LHD autonomes à la mine souterraine NorthParkes en Australie. Ces sources préconisent une approche progressive (phase pilote, déploiement partiel, intégration complète) et insistent sur la planification de la mise en œuvre du système autonome, la formation et la gestion du changement comme conditions essentielles de réussite. Les résultats de cette recherche confirment ces principes, tout en les rendant opérationnels à travers une démarche complète basée sur six dimensions et intégrant des actions concrètes de mise en œuvre.

La méthode de gestion des risques proposée dans ce mémoire combine les normes ISO 12100:2010 (sécurité des machines) et l'ISO 17757:2019 (machines autonomes et semi-autonomes). Ces normes définissent respectivement les principes de la gestion des risques des machines et de la sécurité des systèmes autonomes et semi-autonomes dans l'exploitation minière. Toutefois, ces normes nécessitent une adaptation afin d'évaluer efficacement les risques associés aux véhicules autonomes. Les résultats de cette recherche vont donc plus loin en introduisant le critère de détectabilité/maîtrise de la défaillance (D), en remplacement de la « possibilité d'évitement » de l'ISO 12100, conformément aux recommandations du GMG qui soulignent l'importance de la surveillance et du diagnostic automatique dans les systèmes autonomes. Contrairement aux approches conceptuelles comme le STPA, la méthode élaborée ici est opérationnelle et mesurable, grâce à la matrice à quatre critères (G, F, O, D) et aux cinq niveaux de risque définis. Elle intègre des indicateurs techniques (couverture diagnostique, latence de détection, taux de faux négatifs) qui facilitent l'audit et la priorisation des actions correctives. Ainsi, cette approche comble les limites des modèles existants en offrant une méthode structurée, semi-quantitative et applicable aux systèmes complexes comme les véhicules autonomes.

5.4 Apports de la recherche

La rédaction de ce mémoire s'inscrit dans un contexte où les recherches scientifiques portant sur les risques associés aux véhicules autonomes en milieu souterrain demeurent encore limitées. Ce travail constitue ainsi une première contribution structurante, comparable à la pose de la première pierre d'un édifice scientifique et technique destiné à encadrer l'intégration sécuritaire et l'exploitation de ces technologies dans les mines souterraines. Les apports pratiques et scientifiques de cette recherche sont multiples :

- il apporte une connaissance approfondie des modes de défaillance des véhicules autonomes opérant dans les mines souterraines, mettant en lumière les typologies de risque associées ;
- il présente un bilan des avantages et des défis liés à l'exploitation de ces véhicules en milieu souterrain : informations cruciales pour une gestion du changement réussie ;
- il fournit une feuille de route détaillée pour l'intégration progressive et sécuritaire des véhicules autonomes en milieu souterrain, inspirée des lignes directrices du GMG et des travaux de Burgess-Limerick sur les facteurs humains ;
- il constitue une référence méthodologique pour les futurs projets d'autonomie dans les mines souterraines québécoises et internationales. La méthode intégrée de gestion des risques proposée permettra la collecte des données empiriques pour une évaluation des risques complète et efficace.

Au-delà de sa portée académique, ce travail contribue à outiller les acteurs du secteur minier pour anticiper, évaluer et maîtriser les risques émergents liés à l'autonomie, tout en renforçant la culture de sécurité au sein de l'industrie.

5.5 Limites de la recherche

Bien que ce travail ait couvert de manière approfondie la caractérisation des risques santé et sécurité liés aux véhicules autonomes et à leur intégration en milieu souterrain, il présente néanmoins certaines limites directement liées à son caractère exploratoire et préliminaire.

D'une part, il n'a pas été possible de mener des entrevues ou des observations directes dans les mines souterraines afin de recueillir des informations de terrain sur le fonctionnement réel des véhicules autonomes et sur leurs modes de défaillance en exploitation. Les entreprises contactées n'ont pas pu participer aux entretiens semi-dirigés prévus, en raison notamment des contraintes opérationnelles, des obligations de confidentialité et la sensibilité des données relatives à la sécurité, à la performance et à la fiabilité des systèmes autonomes. Cette limitation a restreint l'accès à des données empiriques essentielles pour valider les modèles proposés, limiter les hypothèses et observer le comportement des systèmes dans des situations réelles d'exploitation.

D'autre part, la démarche d'intégration sécuritaire et la méthode intégrée de gestion des risques élaborées dans ce mémoire n'ont pas encore fait l'objet d'une mise en œuvre expérimentale au sein d'une mine souterraine.

Aussi, l'élaboration de la méthode d'évaluation des risques proposée dans ce mémoire s'appuie sur deux normes internationales, ISO 12100 : 2010 et ISO 17757 : 2019, initialement destinées aux concepteurs et aux fabricants de machines. Néanmoins, ces normes demeurent pertinentes dans le cadre de la présente étude, dans la mesure où l'atteinte d'un niveau de maturité technologique élevé des véhicules autonomes repose sur une collaboration étroite et continue entre fabricants et exploitants miniers. Les retours d'expérience issus de l'exploitation réelle en milieu souterrain constituent en effet une source essentielle d'information pour améliorer la conception, la sécurité et la fiabilité des systèmes autonomes. L'utilisation de ces normes permet ainsi d'établir un langage commun entre les acteurs de la conception et de l'exploitation, favorisant une approche intégrée et évolutive de la gestion des risques.

5.6 Avenues de recherche

Même si dans les limites de la recherche il est indiqué que des entrevues et observations directes dans les mines n'ont pas eu lieu, la démarche proposée contient plusieurs éléments nécessitant une validation. Par exemple, l'ASP mines, des conseillers SST ou des préventionnistes pourraient faire un retour sur la démarche proposée. Ce serait une forme de validation terrain.

Cette validation permettrait de tester la démarche en conditions réelles, d'ajuster ses dimensions en fonction des contraintes techniques, organisationnelles et humaines du terrain, et d'en faire émerger une version standardisée et transférable pour l'ensemble de l'industrie.

De plus, elle permettrait de vérifier la pertinence et la fiabilité des critères utilisés (gravité, fréquence, probabilité, possibilité d'évitement ou détectabilité), d'affiner la pondération des niveaux de risque et de transformer la méthode en un outil pratique pour les exploitations minières autonomes.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

Ce mémoire avait pour objectif général de réaliser une analyse exploratoire des risques liés à l'utilisation des véhicules autonomes dans les mines souterraines et de proposer une démarche de prévention préliminaire, fondée sur les connaissances scientifiques et normatives existantes. La question centrale de recherche était « comment introduire et utiliser de façon sécuritaire des véhicules autonomes dans une mine souterraine ? ». Pour atteindre cet objectif, trois objectifs spécifiques ont orienté notre recherche :

- Dresser un état des connaissances sur les risques, bénéfices et défis associés à l'introduction des VA en milieu souterrain ;
- Proposer une démarche préliminaire d'intégration sécuritaire des véhicules autonomes dans une mine souterraine, adaptée aux réalités opérationnelles du contexte québécois ;
- Élaborer une méthodologie conceptuelle d'évaluation des risques adaptée à ces véhicules.

La méthodologie adoptée reposait sur une étude documentaire approfondie, appuyée par l'analyse critique des normes, rapports industriels, travaux scientifiques et études de cas réels portant sur la sécurité des systèmes autonomes. Cette démarche a permis d'identifier les principaux risques technologiques, humains et organisationnels liés à l'autonomie, d'évaluer les enjeux SST et de concevoir des outils pratiques pour encadrer l'intégration progressive des véhicules autonomes.

Les résultats de cette recherche ont permis de :

- Mettre en évidence les bénéfices et défis de l'autonomie, notamment la réduction des expositions physiques et l'augmentation de la productivité, mais aussi l'émergence de nouveaux risques cognitifs et de communication ;
- Identifier les catégories de risques émergents liés à l'autonomie : physiques, technologiques, humains, psychosociaux et organisationnels ;
- Ressortir les défis rencontrés et les facteurs de succès à l'issue de l'analyse comparative de deux cas d'implantation de véhicules autonomes documentés dans la littérature ;
- Élaborer une démarche d'intégration sécuritaire en croisant les directives du GMG et les travaux de Burgess-Limerick sur les facteurs humains. La démarche est structurée autour

de six dimensions : réglementation, gestion du changement, rôles et responsabilités des parties prenantes, zones de fonctionnement autonomes et gestion des accès, gestion des données et mise en service ;

- Développer une méthode intégrée de gestion des risques combinant les normes ISO 12100 et ISO 17757. La méthode est fondée sur quatre critères (gravité, fréquence, probabilité, détectabilité) et cinq niveaux de criticité, permettant une évaluation mesurable et hiérarchisée des risques. Cette méthode constitue une adaptation innovante des cadres ISO aux réalités du milieu souterrain, en remplaçant la « possibilité d'évitement » par la détectabilité/maîtrise de la défaillance, plus pertinente pour les systèmes autonomes.

Des scénarios d'accidents réels documentés dans la littérature ont ensuite été analysés afin de tester la cohérence et la pertinence de la méthode proposée.

Ce travail présente plusieurs apports pratiques : une feuille de route d'intégration sécuritaire, une méthode opérationnelle d'évaluation des risques, et une référence méthodologique pour les projets d'autonomie à venir. Il constitue ainsi une première contribution globale à la connaissance scientifique sur la sécurité des systèmes autonomes miniers.

Certaines limites subsistent, notamment l'absence de validation sur le terrain faute d'accès aux sites miniers, ce qui justifie des pistes de recherche futures : la validation de la démarche d'intégration et de la méthode d'évaluation par l'ASP mines ou des conseillers SST et préventionnistes.

En somme, ce mémoire constitue ainsi une contribution exploratoire à la compréhension des risques associés aux véhicules autonomes en mines souterraines.

RÉFÉRENCES

- Arjoun, Y., & Faruque, S. (janvier 2020). *Smart Jamming Attacks in 5G New Radio: A Review*. 2020 10th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC) (p. 1010-1015). 10.1109/CCWC47524.2020.9031175
- Association Canadienne de Normalisation. (2004). *CSA Z432-2004 (R2014) - Z432-04 (R2014) - Safeguarding of Machinery*. <https://webstore.ansi.org/standards/csa/csaz4322004r2014>
- Association des commissions des accidents du travail du Canada. (2023). *ACATC | Programme national de statistiques sur les accidents du....* ACATC. <https://awcbc.org/fr/statistics/programme-national-de-statistiques-sur-les-accidents-du-travail-maladies>
- Association minière du Québec. (17 octobre 2017). *Types de mines*. Association Minière du Québec. <https://amq-inc.com/types-de-mines/>
- Association minière du Québec (AMQ). (9 novembre 2022). *L'industrie minière : des retombées économiques majeures pour tout le Québec*. Association minière du Québec. <https://amq-inc.com/lindustrie-miniére-des-retombees-economiques-majeures-pour-tout-le-quebec/>
- Association Paritaire pour la Santé et la sécurité du travail, secteur Affaires Municipales - APSAM. (22 avril 2025). *Règlement modifiant le Code de sécurité pour les travaux de construction : protection contre les chutes et sauvetage*. APSAM. <https://www.apsam.com/actualites/reglement-modifiant-le-code-de-securite-pour-les-travaux-de-construction-protection-contre-les-chutes-et-sauvetage>
- Badri, A., Boudreau-Trudel, B., & Souissi, A. S. (2018). Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? *Safety Science*, 109, 403-411. 10.1016/j.ssci.2018.06.012
- Bathla, G., Bhadane, K., Singh, R. K., Kumar, R., Aluvalu, R., Krishnamurthi, R., ... Basheer, S. (2022). Autonomous Vehicles and Intelligent Automation: Applications, Challenges, and Opportunities. *Mobile Information Systems*, 2022(1), 7632892. 10.1155/2022/7632892
- Ben Aziza, M. N., Badri, A., & Chihi, F. (2020). OHS-Related Risks in an Industry 4.0 Manufacturing Plant. In C. M. Hussain & P. Di Sia (Eds.), *Handbook of Smart Materials, Technologies, and Devices : Applications of Industry 4.0*. Springer International Publishing., 238-256. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84205-5_6
- Ben Aziza, M. N., Hajer, J., Adel, B., Souso, K., Peterson, C., & Rivard, M. (2023). Défis de SST des technologies autonomes dans le contexte de l'industrie 4.0 : cas des VAG et des cobots, 10.
- Benlaajili, S., Moutaouakkil, F., & Chebak, A. (2021). Infrastructural requirements for the implementation of autonomous trucks in open-pit mines. *E3S Web of Conferences*, 315, 03009. 10.1051/e3sconf/202131503009

- Burgess-Limerick, R., Horberry, T., Cronin, J., & Steiner, L. (1 janvier 2017). *Mining automation human-systems integration: a case study of success at CMOC-Northparkes*. 13th AusIMM Underground Operators' Conference 2017 (p. 93-98). <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:721196>
- Burgess-Limerick, Robin. (2020). Human-Systems Integration for the Safe Implementation of Automation. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37(6), 1799-1806. 10.1007/s42461-020-00248-z
- Burgess-Limerick, Robin, Horberry, T., Lynas, D., Hill, A., & Haight, J. M. (2025). *Human Systems Integration for Mining Automation*. CRC Press.
- Burlet-Vienney, D., Chinniah, Y., & Aucourt, B. (2017). *Implantation du cadenassage des équipements mobiles dans le secteur municipal : étude exploratoire* (Rapport n° R-975). IRSST. <https://pharesst.irsst.qc.ca/rapports-scientifique/147>
- Chia, W. M. D., Keoh, S. L., Goh, C., & Johnson, C. (2022). Risk Assessment Methodologies for Autonomous Driving: A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(10), 16923-16939. 10.1109/TITS.2022.3163747
- CNESST. (2021). *Corriger les risques en milieu de travail | Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail - CNESST* [2021]. <https://www.cnesst.gouv.qc.ca/fr/prevention-securite/organiser-prevention/faire-un-programme-prevention/corriger-risques>
- Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. (2015). *Les robots s'intègrent dans l'usine du futur* (p. 20). <https://www.cea.fr/presse/Documents/DP/2015/dossier-presse-usine-du-futur-et-robotique-16092015.pdf>
- Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail - CNESST. (1 novembre 2024). *Statistiques annuelles 2023 | Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail - CNESST*. <https://www.cnesst.gouv.qc.ca/fr/organisation/documentation/formulaires-publications/statistiques-annuelles>
- Corke, P., Roberts, J., Cunningham, J., & Hainsworth, D. (2008). Mining Robotics. Dans *Springer Handbook of Robotics*, (B. Siciliano&O. Khatib, p. 1127-1150). 10.1007/978-3-540-30301-5_50
- Dekker, S., Cilliers, P., & Hofmeyr, J.-H. (2011). The complexity of failure: Implications of complexity theory for safety investigations. *Safety Science*, 49(6), 939-945. 10.1016/j.ssci.2011.01.008
- Dufour, A. (2017). VOITURE AUTONOME CONTRÔLE HUMAIN. *Centre National de la Recherche Scientifique*, 46.
- Ellis, Z. (2023). *Autonomous Surface Drilling: KGHM Robinson Mine*. [Presentation at the Partnership for Mine Automation and Emerging Health and Safety Technologies Meeting, September 21]. <https://www.holmessafety.org/wp-content/uploads/2023-09-20-1105-Ellis-Case-study-2-Epiroc.pdf>

Flaus, J.-M. (2019). *Cybersécurité des systèmes industriels*. ISTE Group.

FutureBridge. (2022). Autonomous Haulage Systems – The Future of Mining Operations. *FutureBridge*. <https://www.futurebridge.com/industry/perspectives-industrial-manufacturing/autonomous-haulage-systems-the-future-of-mining-operations/>

Gaber, T., El Jazouli, Y., Eldesouky, E., & Ali, A. (2021). Autonomous Haulage Systems in the Mining Industry: Cybersecurity, Communication and Safety Issues and Challenges. *Electronics*, 10(11), 1357. 10.3390/electronics10111357

GMG. (2021). RIO TINTO'S EXPERIENCE WITH AUTOMATION IMPROVING SAFETY FOR EMPLOYEES AND CREATING VALUE. <https://gmgroup.org/wp-content/uploads/2023/12/2021-01-11-Rio-Tintos-Experience-with-Automation-and-People.pdf>

GMG. (2023). *Guideline for the Implementation of Autonomous Systems in Mining* (Rapport n° 2) (p. 61). Global Mining Guidelines Group (GMG). <https://gmgroup.org/guideline-for-the-implementation-of-autonomous-systems-in-mining-2/>

Government of Western Australia, Department of Mines and Petroleum Resources Safety. (2015). *Safe mobile autonomous mining in Western Australia - Code of practice* (p. 47). www.dmp.wa.gov.au/ResourcesSafety

Gronier, G., Ferrero, F., Faye, S., Vandenabeele, L., Egmond, P. V., Sagot, J.-C., ... Bert, N. (2019). *Véhicules autonomes et connectés : quels nouveaux défis pour l'ergonomie ?*. Actes du 54ème Congrès de la SELF, Université de l'Ergonomie : Comment contribuer à un monde ?, Tours, 25, 26 et 27 septembre 2019.

Hassal, M. E., Seligmann, B., Lynas, D., Haight, J., & Burgess-Limerick, R. (janvier 2022). *Predicting Human-System Interaction Risks Associated with Autonomous Systems in Mining*. Human Factors in Robots, Drones and Unmanned Systems (vol. 57, p. 78-85). 10.54941/ahfe1002313

Hongmin, W., Wei, Q., & Song, Y. (28 octobre 2024). A Review of Integrated Risk Assessment of Safety and Security in Industrial Control SystemsSSRN Scholarly Paper. Social Science Research Network. 10.2139/ssrn.5002079

Horberry, T. (2012). The Health and Safety Benefits of New Technologies in Mining: A Review and Strategy for Designing and Deploying Effective User-Centred Systems. *Minerals*, 2(4), 417-425. 10.3390/min2040417

Horberry, T., Burgess-Limerick, R., & Steiner, L. J. (2018). *Human-Centered Design for Mining Equipment and New Technology*. CRC Press. 10.1201/9781315105772

IBM. (27 juillet 2021). *Qu'est-ce que l'automatisation ?* IBM. <https://www.ibm.com/fr-fr/topics/automation>

Imam, M., Baïna, K., Tabii, Y., Ressami, E. M., Adlaoui, Y., Benzakour, I., & Abdelwahed, E. hassan. (2023). The Future of Mine Safety: A Comprehensive Review of Anti-Collision Systems Based on Computer Vision in Underground Mines. *Sensors*, 23(9), 4294. 10.3390/s23094294

Immersive Technologies. (2025). *Immersive Technologies - Remote Operation Training Technologies*. <https://www.immersivetechologies.com/solutions/Remote-Operation-Training-Technologies.htm>

Institut national de recherche en informatique et en automatique, Inria. (29 mai 2018). *Véhicules autonomes et connectés, les défis actuels et les voies de recherche*. Industries du futur. <https://www.inria.fr/fr/vehicules-autonomes-connectes-iot-transport>

Institut national des mines. (20 février 2020). *Les camions autonomes chez Hecla Québec - Mine Casa* Berardi. Mbiance. https://inmq.gouv.qc.ca/publication/208/CAMIONS_AUTONOMES_HECLA_QUEBEC

International Electrotechnical Commision. (2010). *IEC 61508-1:2010*. <https://webstore.iec.ch/en/publication/5515>

International Organization for Standardization. (2010). *ISO 12100:2010*. ISO. <https://www.iso.org/fr/standard/51528.html>

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 19296:2018*. ISO. <https://www.iso.org/standard/64455.html>

International Organization for Standardization. (2019). *ISO 17757:2019*. ISO. <https://www.iso.org/standard/76126.html>

International Organization for Standardization. (2023a). *ISO 13849-1:2023*. ISO. <https://www.iso.org/fr/standard/69883.html>

International Organization for Standardization. (2023b). *ISO 31000:2018*. ISO. <https://www.iso.org/fr/standard/65694.html>

International Organization for Standardization. (2024). *ISO 45001:2018*. ISO. <https://www.iso.org/fr/standard/63787.html>

Irosoft, architecture de gestion de l'information législative-legal information management system. (2024). - *Règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines*. <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/S-2.1,%20r.%2014>

Jean-Baptiste. (27 janvier 2025). Capteurs voitures autonomes : les technologies LiDAR, radar et caméras décryptées | Voiture autonome. <https://voitureautonome.com/capteurs-voitures-autonomes-les-technologies-lidar-radar-et-cameras-decryptees/>

Kornecki, A. J., & Liu, M. (2013). Fault Tree Analysis for Safety/Security Verification in Aviation Software. *Electronics*, 2(1), 41-56. 10.3390/electronics2010041

- Kriaa, S., Bouissou, M., Colin, F., Halgand, Y., & Pietre-Cambacedes, L. (2014). *Safety and Security Interactions Modeling Using the BDMP Formalism: Case Study of a Pipeline*. A. Bondavalli & F. Di Giandomenico (édit.), Cham (p. 326-341). Springer International Publishing. 10.1007/978-3-319-10506-2_22
- Kyrkou, C., Papachristodoulou, A., Kloukiniotis, A., Papandreou, A., Lalos, A., Moustakas, K., & Theocharides, T. (juillet 2020). *Towards Artificial-Intelligence-Based Cybersecurity for Robustifying Automated Driving Systems Against Camera Sensor Attacks*. 2020 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI) (p. 476-481). 10.1109/ISVLSI49217.2020.00-11
- Lakomicki, P., Tourbier, Y., Castanier, B., & Grall, A. (octobre 2018). *Encadrement de la fiabilité du véhicule autonome pour guider les tests de validation*. Reims, France. <https://hal.science/hal-02066474>
- Leveson, N. G. (2012). *Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety*. The MIT Press. <https://direct.mit.edu/books/oa-monograph/2908/Engineering-a-Safer-WorldSystems-Thinking-Applied>
- Liu, H., Su, T., & Guo, J. (2025). Autonomous driving enhanced: a fusion framework integrating LiDAR point clouds with monovision depth-aware transformers for robust object detection. *Engineering Research Express*, 7(1). 10.1088/2631-8695/ada7c7
- Liu, K., Gong, J., Chen, S., Zhang, Y., & Chen, H. (2018). Model Predictive Stabilization Control of High-Speed Autonomous Ground Vehicles Considering the Effect of Road Topography. *Applied Sciences*, 8(5), 822. 10.3390/app8050822
- Mahdevari, S., Shahriar, K., & Esfahanipour, A. (2014). Human health and safety risks management in underground coal mines using fuzzy TOPSIS. *Science of The Total Environment*, 488-489, 85-99. 10.1016/j.scitotenv.2014.04.076
- Matheus, P. (2018). Les techniques et conditions d'exploitation des mines aurifères. *Annales des Mines - Réalités industrielles*, 2018(4), 10-19. 10.3917/rindu1.184.0010
- Matthieu, E. (2024). *Automatisation des tâches : objectifs, outils et exemples*. BDM. <https://www.blogdumoderateur.com/automatisation-taches-objectifs-exemples-outils/>
- Ministère des Transports et de la Mobilité Durable. (2025). *Véhicules autonomes - Transports et Mobilité durable Québec*. <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/modes-transport-utilises/vehicules-autonomes/pages/vehicules-autonomes.aspx>
- Ministère du Travail - Direction de l'animation de la recherche, des études et des statistiques - DARES. (2024). *Les accidents du travail | DARES*. <https://dares.travail-emploi.gouv.fr/donnees/les-accidents-du-travail>
- Moore, P. (6 juillet 2023). AHS longevity in action - Komatsu fleet at Gaby passes 1,000 Mt moved. *International Mining*. <https://im-mining.com/2023/07/06/ahs-longevity-in-action-komatsu-fleet-at-gaby-passes-1000-mt-moved/>

Moreau, K., Laamanen, C., Bose, R., Shang, H., & Scott, J. A. (2021). Environmental impact improvements due to introducing automation into underground copper mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 31(6), 1159-1167. 10.1016/j.ijmst.2021.11.009

National Highway Traffic Safety Administration. (2017). *Automated Driving Systems: A Vision for Safety*. https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/13069a-ads2.0_090617_v9a_tag.pdf

Nguyen, T. H. (8 septembre 2011). *Contribution à la planification de projet : proposition d'un modèle d'évaluation des scénarios de risque-projet* [Phdthesis, Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT]. <https://theses.hal.science/tel-04238921>

Novak, T., & Gerstinger, A. (2010). Safety- and Security-Critical Services in Building Automation and Control Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(11), 3614-3621. 10.1109/TIE.2009.2028364

NSW Resources. (2025). *Resources Regulator*. <https://www.resources.nsw.gov.au/resources-regulator>

Paraszcak, J., Gustafson, A., & Schunnesson, H. (2015). Technical and operational aspects of autonomous LHD application in metal mines. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 29(5), 391-403. 10.1080/17480930.2015.1086553

Pascoe, T., McGough, S., & Jansz, J. (2022). From truck driver awareness to obstacle detection : A tiger never changes its stripes. *World Safety Journal*, Vol. XXXI, No 2, 15-28.

Petit, J., Stottelaar, B., Feiri, M., & Kargl, F. (2015). *Remote Attacks on Automated Vehicles Sensors: Experiments on Camera and LiDAR*.

Piètre-Cambacédès, L., & Bouissou, M. (2013). Cross-fertilization between safety and security engineering. *Reliability Engineering & System Safety*, 110, 110-126. 10.1016/j.ress.2012.09.011

Ren, K., Wang, Q., Wang, C., Qin, Z., & Lin, X. (2020). The Security of Autonomous Driving: Threats, Defenses, and Future Directions. *Proceedings of the IEEE*, 108(2), 357-372. 10.1109/JPROC.2019.2948775

Rhayma, N., Talon, A., Breul, P., & Goirand, P. (2013). Vers une nouvelle méthodologie de notation des ouvrages souterrains RATP. *31e Rencontre de l'AUGC, E.N.S. Cachan, 29 au 31 mai 2013*, 10.

R, H., M, S.-A., & J, C. (1995). Etude des systèmes de détection d'humains et d'anticollision pour les véhicules opérant en milieu minier. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST). Montréal (Canada). <https://portaildocumentaire.inrs.fr/Default/doc/SYRACUSE/103348/etude-des-systemes-de-detection-d-humains-et-d-anticollision-pour-les-vehicules-operant-en-milieu-mi>

Ruminy, J., Traore, D., Merlo, E., Moukkes, R., Julia, S., & Mehdizadeh, R. (octobre 2020). *La réalité virtuelle au service de la sécurité minière - développement d'un prototype*. Le Havre (e-congrès), France (p. 11). <https://hal.science/hal-03331314>

SAAQ. (s. d.-a). *Autobus et minibus autonomes*. SAAQ. <https://saaq.gouv.qc.ca/saaq/documentation/projets-pilotes/autobus-minibus-autonomes>

SAAQ. (s. d.-b). *Véhicule autonome*. SAAQ. <https://saaq.gouv.qc.ca/securite-routiere/moyens-deplacement/vehicule-autonome>

Safe Work Australia. (2025). - *Mining | Safe Work Australia*. <https://www.safeworkaustralia.gov.au/safety-topic/industry-and-business/mining>

Sciences et Technologies des Aliments. (2025). AMDEC : Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité - ScienTecAL. <https://scientecal.com/methode-amdec/>

Suncor. (10 juillet 2024). *Développer le plus important parc de véhicules autonomes au Canada*. Suncor. <https://www.suncor.com/fr-ca/nouvelles-et-histoires/nos-histoires/developper-le-plus-important-parc-de-vehicules-autonomes-au-canada>

Taleb, H. A. (2017). Mimo-ofdm pour les communications sans-fil dans les mines souterraines, 75.

Thibault, M., Patrice, R., Sébastien, M., Alexandre, T., Gauthier, E., & Perrin de Kierzkowski, J. (octobre 2022). *Assessment of STPA methodology and first feedback on use cases*. Paris Saclay, France. <https://hal.science/hal-03878539>

Thompson, R. (2011). Mine Road Design and Management In Autonomous Hauling Operations : A Research Roadmap. *Second International Future Mining Conference 2011 Paper Number: 2*, 23.

Tsung, C.-K., Chang, F.-S., & Liu, X.-Y. (2022). On the Construction of an Edge-Based Remote Sensing Framework: The Applications on Automated Guided Vehicles and Drones. *Electronics*, 11(7), 1034. 10.3390/electronics11071034

U.S Department of Labour - Mine Health and Safety Administration. (2025). *Fatality Reports | Mine Safety and Health Administration (MSHA)*. Mine Health and Safety Administration. <http://www.msha.gov/data-and-reports/fatality-reports/search>

Ville de Montréal. (15 mai 2017). *Véhicules autonomes : de la connectivité sans fil à l'assurance automobile du futur pour faire rayonner Montréal | Innovation Développement MTL | ID MTL | Français*. <https://ville.montreal.qc.ca/idmtl/vehicules-autonomes-de-la-connectivite-sans-fil-a-lassurance-automobile-du-futur-pour-faire-rayonner-montreal/>

Williams, P. (18 mars 2019). *BHP autonomous trucks collide at Pilbara iron ore mine*. The West Australian. <https://thewest.com.au/business/mining/bhp-autonomous-trucks-collide-at-jimblebar-iron-ore-mine-in-pilbara-ng-b881139676z>

Zhang, M., Abbas-Turki, A., Mualla, Y., Koukam, A., & Tu, X. (2022). Coordination Between Connected Automated Vehicles and Pedestrians to Improve Traffic Safety and Efficiency at Industrial Sites. *IEEE Access*, 10, 68029-68041. 10.1109/ACCESS.2022.3185734

Zoubir, D. A. (2022). Ventilation des mines souterraines, 140.

8813 BC Guidelines for Safe Mobile Autonomous Mining.
https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/mineral-exploration-mining/documents/health-and-safety/code-review/guideline_safe_mobile_autonomous_mining_v1_nov2022.pdf

ANNEXES

ANNEXE A GESTION DU CHANGEMENT

Tableau A.1 Étapes du plan de gestion du changement

Items	Sous-items	Description de la tâche	Références
Diagnostic initial	Nature du site	Greenfield : concevoir directement les infrastructures, zones autonomes, connectivité, salle de commande, etc.	(GMG, 2023)
		Bronwfield : élaborer un plan de transition à travers la cartographie des processus existants, l'adaptation progressive (interaction véhicules conventionnels/autonomes).	
	Capacités internes	Inventaire des compétences disponibles (opérateurs, superviseurs, maintenance).	(GMG, 2023)
		Identification des écarts et élaborer un plan de formation ou recrutement ciblé	
	Installations	Vérification de la compatibilité des infrastructures (ventilation, réseau 5G/Wi-Fi souterrain, ateliers, énergie, routes, etc.)	
Planification et stratégie de déploiement	Choix de l'approche	<i>Phase pilote → phase progressive → intégration complète</i> (recommandée par le GMG)	(GMG, 2023)
	Feuille de route	Définir des jalons clairs : conception, test pilote, évaluation, expansion, intégration totale.	
		Associer chaque jalon à des indicateurs SST, productivité, coûts.	

Tableau A.1 Etapes du plan de gestion du changement (suite)

Items	Sous-items	Description de la tâche	Références
Engagement et satisfaction des parties prenantes		Consultation proactive (syndicats, CNESST, communautés locales, ingénieurs, opérateurs)	
		Mécanismes de communication (réunions, affichage visuel, bulletins réguliers)	
		Transparence sur les impacts (sécurité, emplois, bénéfices attendus)	
Appropriation du changement par les travailleurs	Formation et requalification	Passage d'opérateurs → téléopérateurs / techniciens salle de contrôle	(Burgess-Limerick et al., 2025)
		Modules pratiques + simulations (recommandée par Burgess-Limerick, importance du design centré sur l'utilisateur)	
	Accompagnement psychologique et social	Réduire les craintes liées à la perte d'emploi	
		Montrer que l'autonomie réduit les tâches dangereuses et ouvre de nouveaux rôles.	
Amélioration de la sécurité, productivité et efficacité	Sécurité	Réduction de l'exposition aux poussières, TMS, collisions.	(GMG, 2023)
		Suivi par indicateurs SST (taux d'incidents, presque-accidents).	
	Productivité/efficacité	Comparer le cycle d'exploitation autonome vs conventionnel	
		Analyse de disponibilité/fiabilité des engins autonomes	
	Réduction des coûts	Analyse coûts/tonne transportée avant/après intégration.	

Tableau A.1 Etapes du plan de gestion du changement (suite et fin)

Items	Sous-items	Description de la tâche	Références
Développement des compétences et innovation continue		Création de plan de carrière interne (exemple : mineur → opérateur salle de contrôle → analyste données).	
		Mise en place de boucles de rétroaction : * retours d'expérience des travailleurs, * audits réguliers, * intégration progressive de nouvelles technologies (IA, capteurs).	(Burgess-Limerick et al., 2025)
		Participation à des consortiums et réseaux (GMG, AMQ, universités, Institut canadien des mines, etc.)	

ANNEXE B RESPONSABILITÉS DES PARTIES PRENANTES

Tableau B.1 Responsabilités des parties prenantes

Partie prenantes	Responsabilités principales	Références
FEO/fournisseur de système	Fournir la documentation technique (capacités, limites, procédures de maintenance, sécurité, etc.) Adapter les guides d'utilisation à la langue de l'exploitant Installer et mettre en service le système autonome Garantir le fonctionnement optimal du système (logiciels, capteurs, interfaces, salle de contrôle) Assurer un accompagnement technique continu Offrir la formation initiale et continue du personnel concerné par la technologie autonome (recyclage, évaluation de compétences)	(GMG, 2023)
Exploitant minier	Allouer les ressources techniques, humaines et financières Planifier les opérations autonomes (transport, forage, horaires, logistique) Adapter les infrastructures souterraines aux exigences des véhicules Garantir la stabilité du réseau de communication et la cybersécurité Suivre et analyser les indicateurs de performance (sécurité, productivité, disponibilité)	
Opérateur à distance	Superviser les véhicules autonomes en temps réel Remonter les problèmes rencontrés sur le système et participer aux retours d'expérience Proposer des solutions pratiques en collaboration avec le fabricant et l'exploitant Jouer un rôle clé dans l'appropriation de la technologie par les équipes	(Burgess-Limerick et al., 2025)
Responsable SST	Elaborer et mettre en œuvre un programme SST adapté aux véhicules autonomes Identifier, analyser et réduire les risques physiques, ergonomiques, cognitifs et psychosociaux Sensibiliser régulièrement les opérateurs systèmes et les impliquer dans la recherche des mesures de prévention Développer des scénarios d'urgence et les intégrer au plan global de la mine Organiser des exercices de simulation et des tests périodiques	
Responsable maintenance	Concevoir et appliquer un plan de maintenance prédictive Suivre avec le fabricant les mises à jour logicielles et matérielles (capteurs, interfaces, barrières de sécurité immatérielles, etc.) Définir des procédures sécuritaires pour les interventions de personnes en atelier et en zone autonome Assurer la traçabilité des interventions et prévenir les pannes critiques	

ANNEXE C ZONES AUTONOMES ET GESTION DES ACCÈS

Tableau C.1 Gestion des zones autonomes et des accès

Dimensions	Actions à mettre en place	Références
Délimitation des ZFA	Etablir une cartographie précise et dynamique des zones autonomes, mise à jour régulière en fonction de l'avancement des travaux souterrains (GMG, 2023, référence à mettre) Définir les zones d'exclusion strictes, accessibles uniquement aux véhicules autonomes, et les zones de cohabitation où peuvent circuler simultanément véhicules autonomes, équipements manuels et travailleurs Intégrer cette cartographie dans les systèmes de gestion de la mine et dans l'interface utilisateur en salle de contrôle	(GMG, 2023)
Contrôle des accès	Installer des barrières physiques (portails, blocs de béton, grilles) dans les zones critiques afin de limiter les intrusions accidentelles Déployer des barrières immatérielles (LiDAR, rideaux optiques, systèmes de géo repérage) pour détecter toute entrée non autorisée Mettre en place des protocoles d'autorisation électronique (badges, clés ou cartes RFID) pour réguler l'accès des travailleurs aux ZFA	(GMG, 2023)
Surveillance et détection	Fournir aux opérateurs d'équipements manuels évoluant dans la ZFA des dispositifs de surveillance ou d'alerte (alarmes de proximité, capteurs portatifs). Garantir aux opérateurs en salle de contrôle une visibilité en temps réel sur les incidents et intrusions potentielles.	(Burgess-Limerick et al., 2025)
Interfaces utilisateurs et communication	Concevoir des interfaces intuitives permettant de transmettre rapidement aux opérateurs en salle de commande toute alerte critique (proximité véhicule-travailleur, intrusions, pannes, proximité véhicule autonome-véhicule conventionnel) Définir des protocoles de communication clairs et stricts entre opérateurs à distance, travailleurs sur site et salle de contrôle pour gérer les situations d'urgence.	(GMG, 2023)

Tableau C.1 Gestion des zones autonomes et des accès (suite et fin)

Dimensions	Actions à mettre en place	Références
Procédures sécuritaires et interventions	Élaborer et formaliser des procédures spécifiques pour toute intervention humaine dans les ZFA (ex. maintenance, inspection, ravitaillement, récupération d'un équipement en panne) Prévoir des arrêts sécurisés du système autonome ou des zones de refuge pour protéger les travailleurs lors d'une intervention. Réaliser régulièrement des exercices de simulation pour tester l'efficacité de ces procédures	
Maintenance et réseau routier souterrain	Assurer en permanence un entretien adéquat des routes souterraines dans les ZFA pour garantir la stabilité et la fiabilité des déplacements autonomes Assécher régulièrement les routes souterraines car elles entraînent le patinage des roues des engins lorsqu'elles sont humides ou mouillées. Détecter et corriger rapidement toute dégradation (ornières, flaques, débris) susceptible de perturber la navigation des véhicules autonomes.	

ANNEXE D MATRICE DE COMBINAISON DE LA CRITICITÉ

Tableau D.1 Matrice de combinaison de la criticité

G = 1					G = 2				
F	P	D	Niveau de risque	Signification	F	P	D	Niveau de risque	Signification
1	1	1	1	Risque négligeable	1	1	1	2	Risque négligeable
1	1	2	2	Risque négligeable	1	1	2	4	Risque acceptable
1	1	3	3	Risque acceptable	1	1	3	6	Risque tolérable sous contrôle
1	2	1	2	Risque négligeable	1	2	1	4	Risque acceptable
1	2	2	4	Risque négligeable	1	2	2	8	Risque tolérable sous contrôle
1	2	3	6	Risque tolérable sous contrôle	1	2	3	12	Risque inacceptable
1	3	1	3	Risque acceptable	1	3	1	6	Risque tolérable sous contrôle
1	3	2	6	Risque tolérable sous contrôle	1	3	2	12	Risque inacceptable
1	3	3	9	Risque inacceptable	1	3	3	18	Risque inacceptable
2	1	1	2	Risque négligeable	2	1	1	4	Risque acceptable
2	1	2	4	Risque acceptable	2	1	2	8	Risque tolérable sous contrôle
2	1	3	6	Risque tolérable sous contrôle	2	1	3	12	Risque inacceptable
2	2	1	4	Risque acceptable	2	2	1	8	Risque tolérable sous contrôle
2	2	2	8	Risque tolérable sous contrôle	2	2	2	16	Risque inacceptable
2	2	3	12	Risque inacceptable	2	2	3	24	Risque inacceptable majeur
2	3	1	6	Risque tolérable sous contrôle	2	3	1	12	Risque inacceptable
2	3	2	12	Risque inacceptable	2	3	2	24	Risque inacceptable majeur
2	3	3	18	Risque inacceptable	2	3	3	36	Risque inacceptable majeur