

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

**PRISE EN COMPTE SYSTÉMATIQUE DE LA SST DANS LA CONCEPTION,
L'INTÉGRATION ET L'UTILISATION DES VÉHICULES AUTOGUIDÉS
INTELLIGENTS**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE CONCENTRATION GÉNIE INDUSTRIEL**

**PAR
MOHAMMED-AMINE MABSOUT**

OCTOBRE 2023

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN INGÉNIERIE CONCENTRATION GÉNIE INDUSTRIEL (M. Sc. A.)

Direction de recherche :

M. Adel Badri, Ph. D.

Directeur de recherche, UQTR

M. Sousso Kelouwani, Ph. D.

Codirecteur de recherche, UQTR

Jury d'évaluation

M. Sousso Kelouwani, Ph. D.

Codirecteur de recherche, UQTR

M. Pascal Forget, Ph. D.

Département de génie industriel, UQTR

M. Jamal Ben Mansour, Ph. D.

Département de gestion des RH, UQTR

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon directeur, Adel Badri et à mon codirecteur, Sousso Kelouwani de m'avoir encadré tout au long de cette recherche. Leur soutien indéfectible et leurs conseils éclairés ont grandement enrichi mon travail et mené à bien ce mémoire. Je leur suis très reconnaissant pour leurs disponibilités.

Ma reconnaissance va également à Mohamed Naceur Ben Aziza pour son accompagnement et ses conseils précieux de rédaction. Son expertise et son soutien ont été d'une importance capitale pour affiner mes idées et améliorer la qualité de mon travail.

Je souhaite également remercier Lotfi Zeghmi pour sa collaboration précieuse lors des démarches méthodologiques, notamment la simulation, ainsi que pour nos discussions approfondies sur les dangers liés aux véhicules autonomes. Sa contribution a enrichi cette recherche et a contribué à une meilleure compréhension des enjeux liés à ce domaine.

Je remercie également les organismes qui ont soutenu financièrement ce mémoire, soient : l'Institut de recherche sur l'hydrogène (IRH) et le Laboratoire d'innovation en santé et sécurité du travail (LiSST).

Enfin, je tiens à remercier toute ma famille, mes amis, mon frère et en particulier mes parents à qui je dédie ce mémoire. Merci pour vos soutiens et vos précieux encouragements qui ont été pour moi une source d'inspiration tout au long de ce projet. Votre appui inestimable a été la clé de sa réussite.

RÉSUMÉ

Aujourd'hui, plusieurs entreprises du secteur industriel et de service perçoivent l'utilisation des véhicules autoguidés intelligents (VAI) comme une nécessité. En effet, plusieurs compagnies utilisent ces véhicules pour déplacer de manière autonome des marchandises, des produits dans une usine, un entrepôt ou un atelier. Certains justifient parfois l'utilisation d'un VAI comme étant un moyen de réduire la charge physique des travailleurs permettant ainsi d'éviter les maladies professionnelles, telles que les troubles musculosquelettiques (TMS). Or, cette nouvelle technologie, basée surtout sur l'autonomie, l'intelligence artificielle et leur interaction avec les travailleurs, fait apparaître de nouveaux risques, comme les risques mécaniques, les risques psychosociaux et peuvent causer des accidents majeurs par leur utilisation d'énergie, ainsi que leur manutention des produits dangereux.

L'objectif de ce mémoire est d'identifier les mesures de préventions des dangers liés aux VAI dans la conception, l'intégration et l'utilisation de ces véhicules, le tout dans le but d'intégrer ces véhicules dans l'environnement de travail de manière sécuritaire afin de protéger les travailleurs.

Ce projet de recherche est composé de cinq étapes. La première étape est dédiée à l'identification des dangers liés aux VAI. La deuxième étape est consacrée à la réalisation d'une étude de cas visant à analyser le comportement d'un VAI face à différentes situations. La troisième étape consiste au développement d'un questionnaire d'identification des dangers pour les experts en santé et sécurité au travail (SST), qui s'intéressent aux VAI. La quatrième étape est dédiée à l'identification des solutions de prévention pour contrôler les dangers liés aux VAI. La cinquième étape est consacrée à l'élaboration d'un outil de prévention des dangers liés aux VAI.

Ce travail a permis d'élaborer un outil de prévention d'une large gamme de dangers en lien avec les VAI. Les solutions de prévention de ces dangers ont été intégrées séparément dans les trois phases : conception, intégration et utilisation des VAI.

Cela permet d'assurer une sécurité en continue de l'opération des VAI, de la conception, en passant par l'intégration, puis son utilisation dans l'environnement de travail. Ce travail recommande d'entreprendre des études de cas pratiques pour compléter et adapter les recommandations de prévention des dangers liés aux VAI.

Mots-clés : Véhicules autoguidés intelligents, santé et sécurité au travail, risques mécaniques, intelligence artificielle, outil de prévention, maladies professionnelles.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|------------|
| REMERCIEMENTS | III |
| RÉSUMÉ | IV |
| LISTE DES TABLEAUX | IX |
| LISTE DES FIGURES | X |
| LISTE DES ANNEXES | XI |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES | XII |
| INTRODUCTION | 1 |
| REVUE DE LITTÉRATURE | 2 |
| 1.1 Santé et sécurité au travail | 2 |
| 1.1.1 Généralités..... | 2 |
| 1.1.2 Importance de la prévention..... | 4 |
| 1.1.3 Gestion des risques de SST..... | 6 |
| 1.2 L'Industrie 4.0..... | 9 |
| 1.2.1 Généralités | 9 |
| 1.2.2 Caractéristiques de l'Industrie 4.0..... | 10 |
| 1.2.3 Contexte économique de l'Industrie 4.0 | 11 |
| 1.2.4 Technologies issues de l'Industrie 4.0 | 12 |
| 1.2.5 Défis de la SST en contexte de l'Industrie 4.0..... | 17 |
| 1.3 Véhicules autoguidés | 20 |
| 1.3.1 Généralités..... | 20 |
| 1.3.2 Utilité et importance des AGV..... | 22 |
| 1.3.3 Technologies et conception des AGV..... | 26 |
| 1.3.4 Véhicules autoguidés intelligents..... | 28 |
| 1.3.5 VAI de désinfection ultraviolet..... | 33 |
| 1.3.6 Risques SST liés aux VAI..... | 39 |

| | |
|---|-----------|
| PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS | 59 |
| 2.1 Problématique de recherche | 59 |
| 2.1.1 Identification des éléments du problème..... | 59 |
| 2.2 Questions de recherche | 61 |
| 2.3 Objectifs de la recherche..... | 62 |
| MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE..... | 63 |
| 3.1 Démarche méthodologique de la recherche | 63 |
| 3.2 Identification théorique des dangers en lien avec les AGV | 64 |
| 3.3 Analyse du comportement d'un AGV dans différentes situations..... | 65 |
| 3.4 Développement d'un outil de collecte de données pour les experts en SST qui s'intéressent aux VAI | 67 |
| 3.5 Identification des solutions de prévention pour contrôler les dangers liés aux VAI | 68 |
| 3.6 Élaboration d'un portrait de solution de prévention des dangers en lien avec les VAI | 69 |
| RÉSULTATS ET DISCUSSION | 72 |
| 4.1 Résultats de la simulation..... | 72 |
| 4.2 Outil de collecte de données pour les experts en SST qui s'intéressent aux VAI | 75 |
| 4.3 Solutions de prévention des dangers en lien avec les VAI | 77 |
| 4.3.1 Utilisation de système de détection..... | 77 |
| 4.3.2 Interface et communication entre les travailleurs et les VAI..... | 79 |
| 4.3.3 Signalisation et contrôle des zones de travail dangereuses | 79 |
| 4.3.4 Formation et sensibilisation | 80 |
| 4.3.5 Communication et surveillance..... | 82 |
| 4.3.6 Gestion de la sécurité et du contrôle des VAI..... | 84 |
| 4.3.7 Tests de sécurité pour la prévention des risques liés aux VAI..... | 87 |
| 4.3.8 Vérification des fixations d'objets et contrôle des rayonnages pour les VAI | 91 |
| 4.3.9 Conceptions innovantes pour la prévention des risques liés aux VAI | 92 |
| 4.3.10 Sécurité informatique | 93 |

| | | |
|--------|--|------------|
| 4.3.11 | Règles d'utilisation et de circulation..... | 95 |
| 4.3.12 | Stratégie de maintenance pour la sécurité des VAI | 95 |
| 4.3.13 | Prévention des risques psychosociaux et mentaux liés aux VAI | 96 |
| 4.4 | Portrait de solutions de prévention des dangers en lien avec les VAI | 97 |
| 4.5 | Limites et travaux futurs | 109 |
| | CONCLUSION..... | 112 |
| | RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 113 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1.1 : Différence entre un AGV et un VAI (Hellmann et al., 2019) | 31 |
| Tableau 1.2 : Portrait des dangers liés aux AGV | 47 |
| Tableau 3.1 : Caractéristiques du VAI | 66 |
| Tableau 4.1 : Évaluation des scénarios réalisés sur le VAI | 74 |
| Tableau 4.2 : Tests de sécurité pour la prévention des dangers liés aux VAI pendant la phase de conception | 88 |
| Tableau 4.3 : Tests de sécurité pour la prévention des dangers liés aux VAI pendant la phase d'intégration | 89 |
| Tableau 4.4 : Portrait de solutions de prévention des dangers en lien avec les VAI 98 | |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|-----------|
| Figure 1.1: Flux principal de contrôle d'un AGV (Hu et al., 2017)..... | 23 |
| Figure 1.2 : Spectre électromagnétique (Canada, 2017)..... | 34 |
| Figure 1.3: Dimérisation de la thymine pour un ADN (Acide désoxyribonucléique) double-brin exposé au rayonnement UV(Raeiszadeh et al., 2020) | 36 |
| Figure 1.4 : Échantillon de répartition de puissance spectrale pour différentes sources d'UVC (Raeiszadeh et al., 2020)..... | 38 |
| Figure 1.5 : Représentation d'un cas de travailleur entre deux chariots reliés (KMC, 2021) | 41 |
| Figure 1.6 : Valeurs limites de seuil (VLS) pour l'exposition humaine aux UV sur le spectre UVC (Raeiszadeh et al., 2020)..... | 42 |
| Figure 1.7 : Cas d'un objet situé en pente (Bell et al., 2016) | 44 |
| Figure 1.8 : Récapitulatif des liens de causalité des différents risques généraux liés à l'usage des AGV | 46 |
| Figure 2.1 : Principaux éléments de la problématique de recherche | 61 |
| Figure 3.1 : Démarche méthodologique de la recherche | 64 |
| Figure 3.2 : Identification des dangers liés aux AGV | 65 |
| Figure 4.1 : Détection du mur par le VAI..... | 72 |
| Figure 4.2 : Chemin planifié du VAI..... | 73 |

LISTE DES ANNEXES

| | |
|---|------------|
| ANNEXE 1 : Questionnaire - Véhicules autoguidés intelligents | 124 |
| ANNEXE 2 : Liste des publications en lien avec le mémoire | 131 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ADN : Acide désoxyribonucléique

ADP : Analyse de dangers préliminaire

AGV : Véhicule à guidage automatique

AGVS : Automated Guided Vehicle System

ANSI : American National Standards Institute

ASTM : American Society for Testing and Materials

BSI : British Standard Institute

CCHST : Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail

CFR : Code of Federal Regulations

CHR : Collaboration humain-robot

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

CPS : Cyber-Physical System

CSA : Canadian Standards Association

CSST : Commission de la santé et sécurité au travail

ERP : Enterprise Resource Planning

ESD : Electrostatic Discharge

IdO : Internet des Objets

IEC : International Electrotechnical Commission

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers

IES : Illuminating Engineering Society

IESNA : Illuminating Engineering Society of North America

IHA : Interaction homme-automatisme

IHM : Interaction personne-machine

INRS : Institut national de recherche et de sécurité

ISEA : International Safety Equipment Association

ISO : International Organization for Standardization

LiDAR : Light Detection and Ranging

LSST : Loi sur la santé et la sécurité du travail

MEI : ministère de l'Économie et de l'Innovation du Québec

MES : Manufacturing Execution System

NIOSH : National Institute for Occupational Safety and Health

NIST : National Institute of Standards and Technology

OHSAS : Occupational Health and Safety Assessment Series

OIT : Organisation internationale du travail

OSHA : Occupational Safety and Health Administration

PID : Proportionnel-intégral-dérivé

PMBOK : Project Management Body of Knowledge

RFID : radio frequency identification

RMA : Robots mobiles autonomes

RMI : Radio Magnetic Indicator

ROS : Robot Operating System

RRT : Rapidly-exploring Random Tree

RSP : Répartition spectrale de puissance

SARS-CoV-2 : Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2

SEI : Software Engineering Institute

SST : santé et la sécurité au travail

STM : Scanning Tunneling Microscopy

TMS : Troubles musculosquelettiques

UQTR : Université du Québec à Trois-Rivières

UV : Ultraviolet

UVA : Ultraviolet A

UVB : Ultraviolet B

UVC : Ultraviolet C

VAI : Véhicule autoguidé intelligent

VIA : Véhicule intelligent autonome

VLS : Valeur limite de seuil

INTRODUCTION

Un nombre grandissant des entreprises du secteur industriel et de service perçoivent l'utilisation des véhicules autoguidés intelligents (VAI) comme une nécessité. Certains justifient l'utilisation d'un VAI comme étant un moyen de réduire la charge physique des travailleurs, permettant ainsi d'éviter les maladies professionnelles. Cependant, l'autonomie avancée et l'intelligence artificielle de ces nouvelles technologies, ainsi que leur interaction avec les travailleurs, engendrent de nouveaux risques. Cela comprend les risques physiques et psychosociaux. De plus, leur utilisation d'énergie et leur manutention de produits dangereux peuvent également provoquer des accidents majeurs. Dans un environnement dynamique et incertain, une bonne prise en compte de la SST dès la conception de ces véhicules reste un élément essentiel pour éliminer ou réduire les risques. Au regard des multiples risques que peut avoir l'utilisation des VAI, les entreprises de fabrication desdits véhicules doivent mettre sur le marché un produit fiable qui respecte toutes les exigences ou les normes en matière de SST.

Ainsi, cette étude a visé à répondre à deux questions : 1. Quels sont les dangers liés aux VAI qui ont plus de risque d'apparaître? 2. Comment gérer les dangers existants et émergents à partir de la conception? Le tout est dans un but d'élaborer une démarche de prévention reliée avec les VAI.

Pour répondre aux précédentes questions et atteindre ses objectifs, ce mémoire est structuré comme suit : le premier chapitre présente la revue de littérature. Il a constitué la base du cadre théorique de cette étude. Le deuxième chapitre cerne la problématique et les objectifs de la recherche. Le troisième chapitre détaille la méthodologie de recherche adoptée pour cette étude. Le quatrième chapitre discute les résultats des démarches méthodologique, et présente le portrait de solutions de prévention reliée avec les VAI. Enfin et avant la conclusion, quelques limites de ce projet de recherche et les travaux futurs sont également présentés.

REVUE DE LITTÉRATURE

Le but principal de ce chapitre est de présenter les différents concepts liés à ce mémoire de recherche. Pour atteindre cet objectif, ce chapitre se détaille en trois sections principales. D'abord, la première section (2.1) donne un aperçu général sur la santé et la sécurité au travail (SST). Ensuite, la deuxième section (2.2) présente l'Industrie 4.0 et enfin, la troisième section (2.3) détaille les VAI en précisant par la suite les différents dangers identifiés que représentent ces véhicules dans un portrait.

Il est important de noter que le terme « travailleurs » inclut autant les hommes que les femmes qui travaillent.

1.1 Santé et sécurité au travail

1.1.1 Généralités

Les décès liés au travail sont plus souvent attribués aux maladies professionnelles qu'aux accidents du travail, selon l'Organisation internationale du travail (OIT) (2017). Chaque année, environ 2,78 millions de travailleurs meurent d'une cause liée au travail (OIT, 2017). Environ 2,4 millions de ces décès sont liés à des maladies professionnelles. La proportion restante est causée par des accidents survenus au travail (Morgado et al., 2019). De nos jours, les défis en SST sont de plus en plus omniprésents. Les victimes sont principalement les travailleurs, mais aussi les entreprises et les communautés. Concernant le Québec, le coût d'invalidité liée au travail, en 2011 par exemple, a été d'environ 4,84 milliards de dollars (Mouras et al., 2020). À l'échelle mondiale, le coût total des lésions professionnelles représente 4 % du produit intérieur brut total (OIT, 2017).

La législation en SST établit en général des mécanismes de participation en prévention. Ces mécanismes ont pour but d'éliminer à la source même les menaces sur la santé, la sécurité et l'intégrité physique des travailleurs (Gualtieri et al., 2021). La mise en place d'une gestion intégrée de la SST a pour but de contrôler les dangers qui peuvent apparaître au sein de l'entreprise (Badri et al., 2018).

Les critères de suivi et d'action en SST sont d'une importance cruciale dans la mise en œuvre de la robotique collaborative (Gualtieri et al., 2021). La prise en charge de la SST n'est pas exclusive qu'à l'employeur. Le travailleur a lui aussi des obligations pour assurer la sécurité. Selon la Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST, Québec), les obligations des employeurs et des travailleurs se détaillent comme suit :

➤ Obligations des employeurs :

- *« Identifier, contrôler et éliminer les dangers pour vos travailleurs;*
- *Doter vos établissements d'équipements, d'outils et de méthodes de travail sécuritaires et vous assurer que le travailleur les utilise;*
- *Informer vos travailleurs des risques liés à leur emploi;*
- *Donner à vos travailleurs la formation nécessaire pour qu'ils travaillent de façon sécuritaire;*
- *Superviser le travail de vos employés et vous assurer que les normes de sécurité sont respectées;*
- *Offrir sur place des services de premiers soins », article 51(LSST);*
- *« Établir un programme de prévention (obligatoire pour toute entreprise ciblée par règlement) », article 58 (LSST).*

➤ Obligations des travailleurs :

- *« Prendre les mesures nécessaires pour protéger votre santé, votre sécurité et celle de votre entourage au travail » articles 2 et 3 (LSST);*
- *« Participer à l'identification et à l'élimination des risques au travail », article 5 (LSST);*
- *« Prendre connaissance du programme de prévention » article 1 (LSST);*

- « Collaborer avec le comité de santé et de sécurité », article 6 (LSST);
- « Vous soumettre aux examens médicaux légalement exigés », article 4 (LSST).

Des droits pour les employeurs et les travailleurs sont aussi été exigés :

➤ Droits des employeurs :

- « Recevoir de la formation et de l'information en santé et sécurité au travail », article 50 (LSST);
- « Obtenir des conseils et du soutien pour votre démarche de prévention », article 50 (LSST).

➤ Droits des travailleurs :

- « Obtenir des conditions de travail qui préservent votre santé et votre sécurité au travail », article 9 (LSST);
- « Recevoir de l'information et des conseils en santé et sécurité;
- Recevoir de la formation et une supervision adéquate;
- Avoir accès à des services de santé préventifs », article 10 (LSST);
- « Refuser d'exécuter une tâche si vous croyez qu'elle peut constituer un danger pour votre santé ou celle de quelqu'un d'autre », article 12 (LSST);
- « Si vous êtes enceinte ou si vous allaitez, être affectée à des tâches sans dangers pour votre santé et celle de l'enfant », article 40 (LSST).

1.1.2 Importance de la prévention

Depuis les débuts de l'industrialisation, les travailleurs ont toujours été obligés de faire face à des risques de lésions professionnelles en milieu de travail. Les accidents de travail sont des événements qui surgissent d'une façon imprévisible en milieu de travail (Endroyo

et al., 2015). Les accidents de travail causent des blessures ou même le décès des travailleurs et des dommages non négligeables aux équipements (Badri et al., 2012). Les entreprises doivent forcément se confronter à des effets néfastes, comme les pertes financières et les préjudices humains et sociaux (Endroyo et al., 2015). Morgado et al (2019) définissent la SST comme un ensemble d'activités et de méthodes qui permettent de déterminer et de prévenir les blessures qu'une personne risque d'avoir instantanément dans un milieu de travail et les problèmes de santé qu'on apercevra au fil du temps (maladies professionnelles). Ces activités permettent aussi de mettre en place et d'offrir aux travailleurs un espace de travail sain et sécuritaire (Morgado et al., 2019).

Il faut donc fournir des efforts pour identifier et contrôler les risques d'accidents et de maladies professionnelles qui peuvent se produire au sein des entreprises. Ces entreprises restent les premières responsables quant à la présence des dangers auxquels les travailleurs seront exposés en effectuant différentes tâches (Endroyo et al., 2015). En surveillant les dangers professionnels, il y a toujours un besoin croissant de s'assurer de la conformité d'une entreprise à la politique et aux objectifs en ce qui concerne la SST (Chapman, 2012; Morgado et al., 2019). Une telle conformité aidera l'entreprise à maintenir et améliorer sa performance en SST (Tremblay et al., 2018a). Pour améliorer cette performance, il faudra bien choisir et mettre en place les activités les plus pertinentes de prévention (Tremblay et al., 2018b). Ceci permettra, entre autres, de baisser le taux d'accidents de travail à court et à moyen terme. Cette amélioration ne doit pas être sous-estimée (Tremblay et al., 2018a, Tremblay et al., 2018b). Une meilleure performance en SST peut être identifiée selon deux critères spécifiques (Tremblay et al., 2018a) :

- « Une entreprise est performante si sa gestion de la SST est efficace »;
- « La gestion de la SST est efficace si elle conduit à la réduction ou à l'élimination des accidents du travail et des maladies professionnelles à court ou moyen termes » (traduction libre).

Depuis quelques années, des changements ont touché le niveau organisationnel, ainsi que les méthodes de travail dans la majorité des entreprises (Mouras et al., 2020). Ceci est dû, surtout, à l'intégration des nouvelles technologies en milieu de travail (Tremblay et al., 2018b). Cette intégration contribue à l'apparition de nouveaux dangers. Pour cette raison,

les industriels se trouvent dans l'obligation de mettre en place de nouvelles techniques de prévention et de solutions innovantes pour gérer les dangers professionnels (Mouras et al., 2020). Les nouvelles technologies, les nouvelles méthodes de travail, les procédés et les processus doivent être développés en tenant compte des obligations de la SST (Morgado et al., 2019). L'intégration de la prévention dès la conception sera alors essentielle (Badri et al., 2018). Cela permet aux entreprises de mieux adapter leurs activités de prévention et les actualiser, selon les nouvelles contraintes opérationnelles (Chapman, 2012).

1.1.3 Gestion des risques de SST

L'identification des risques est toujours plus pertinente et plus rentable lorsqu'elle est intégrée dans la conception même du projet industriel, des nouvelles technologies, des équipements, des processus, des procédures, etc. (Laciok et al., 2021). La gestion des risques de SST est considérée comme une démarche complète d'aide à la décision (Bluff, 2003). Cette démarche est utilisée pour anticiper des risques connus et susceptibles d'avoir un impact sur les objectifs de l'entreprise et les contrôles déjà en place (Badri et al., 2018). Les dangers sont regroupés généralement en six familles de risques, selon la Commission des normes de l'équité de la santé et sécurité du travail (CNESST, 2016) : les risques physiques, ergonomiques, chimiques, biologiques, psychosociaux et ceux liés à la sécurité. Les différents risques professionnels sont définis par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) comme suit :

- Risques physiques :

« Formes d'énergie ou forces telles que le bruit, les vibrations, l'électricité, la température, la pression et le rayonnement. » (CNESST, 2016, p. 9).

- Risques liés à la sécurité :

« Pièces mobiles des machines et de l'équipement, angles rentrants, formes des pièces et des matériaux, manipulation d'outils et d'équipement, travail en hauteur ou en espace clos, planchers glissants ou irréguliers, véhicules, clientèle agressive, projection de matériaux, résistance mécanique inadéquate, incendies et explosions. » (CNESST, 2016, p. 9).

- Risques ergonomiques :

« *Tâches répétitives, utilisation d'équipement dont la conception n'est pas adaptée, effort excessif, postures inconfortables ou statiques.* », (CNESST, 2016, p. 9).

- Risques chimiques :

« *Toutes les matières premières et les sous-produits d'un procédé ou d'un produit qui résultent d'une action mécanique, de l'évaporation, de la combustion, de la décomposition ou d'une réaction chimique.* », (CNESST, 2016, p. 9).

- Risques biologiques :

« *Organismes vivants tels que les plantes, les animaux et les agents biologiques (virus, bactéries, parasites, champignons) qui peuvent avoir un effet toxique.* », (CNESST, 2016, p. 9).

- Risques psychosociaux :

« *Facteurs liés à la nature ou à l'organisation du travail tels que harcèlement, violence et agression, ambiguïté des rôles, manque de respect, surcharge de travail, rythme de travail élevé, complexité de la tâche et formation non adéquate.* », (CNESST, 2016, p. 9).

Pour une bonne performance en SST, l'approche utilisée doit se baser sur un effort d'amélioration continue, d'après British Standard Institute (BSI, 2007). Malgré cela, les approches de gestion des risques restent dans la plupart des cas négligées dans les entreprises (Tremblay et al., 2018b). Au Québec, la gestion des risques de SST est considérée comme une obligation légale de l'employeur ayant pour objectif d'éliminer les risques à la source (Mouras et al., 2020). Un modèle sorti selon la norme ISO 45001 (2018), fournit un processus interactif pour parvenir à une amélioration continue de la SST. Ce processus s'appuie sur un système de gestion des risques selon quatre étapes qui doivent être évaluées périodiquement (Morgado et al., 2019) :

- a) *Plan : établir et évaluer les risques en matière de SST, les possibilités en matière de SST, les autres risques et les autres possibilités, établir la SST et les processus*

nécessaires pour obtenir des résultats conformément à la politique de SST de l'entreprise;

- b) Exécuter : mettre en œuvre les processus comme prévu;*
- c) Vérifier : contrôler et mesurer les activités et les processus par rapport à la politique et aux objectifs de SST, et rendre compte des résultats;*
- d) Agir : prendre des mesures pour améliorer continuellement les performances en matière de SST afin d'atteindre le résultat escompté ».*

Le Software Engineering Institute (SEI) détermine deux stratégies de gestion des risques (Badri et al., 2012). Ces stratégies sont applicables aussi pour réduire les risques de SST (OHSAS 18001, 2007) :

- Première stratégie : engager des actions qui sont capables de réduire la probabilité d'occurrence;
- Deuxième stratégie : prendre des mesures qui réduisent l'impact négatif sur le projet s'il y a une possibilité de déclenchement d'un risque.

La participation et l'implication du gestionnaire de projet, des membres de l'équipe de projet, de l'équipe de gestion des risques, des clients, des experts, des utilisateurs finaux et des spécialistes de l'analyse des risques est obligatoire pour une bonne gestion des risques de SST associés à un projet (Gambatese, 2000).

Par la suite, une évaluation qualitative est essentielle pour classer les différents risques par ordre d'importance et en fonction de la probabilité d'occurrence et leur impact sur le projet à réaliser et ses objectifs (PMBOK, 2008). On rajoute souvent un examen quantitatif et on finit par adopter un plan d'action pour contrôler les risques intégrés dans le processus de gestion de projet (Badri et al., 2012). Certains experts ont utilisé d'autres outils adaptés à la gestion des risques de SST, par exemple les listes de contrôle ADP (Analyse de dangers préliminaire), le remue-méninges, l'analyse des contraintes, les études de benchmarking, etc.

En général, la gestion des risques peut être vue comme étant un processus en cinq étapes (Badri et al., 2012) : 1) l'identification des risques, 2) l'analyse des risques, 3) le contrôle des risques, 4) le suivi, 5) le contrôle des mesures correctives mises en place.

1.2 L'Industrie 4.0

1.2.1 Généralités

L'Industrie 4.0 est définie comme une transformation de l'industrie et des systèmes de production grâce à l'intégration de nouvelles technologies interconnectées. Elle a fait son apparition en 2011 grâce à des efforts allemands (Danjou et al., 2017). Cette quatrième révolution industrielle est définie aussi comme une fusion des technologies qui relie le monde physique, numérique et biologique (Mhlanga, 2020). Galati et Bigliardi (2019) définissent les différentes révolutions industrielles comme suit :

- *« L'Industrie 1.0 (fin du 18^e siècle) : représentée par des usines de production mécanique basées sur l'énergie hydraulique et la vapeur;*
- *L'Industrie 2.0 (début du 20^e siècle) : représentée par la production de masse basée sur l'énergie électrique;*
- *L'Industrie 3.0 (dans les années 1970) : caractérisée par une production automatique basée sur l'électronique et la technologie Internet;*
- *L'Industrie 4.0 (à partir de 2011) : représentée par la production de CPS (Cyber-Physical System), basée sur l'intégration de données et de connaissances hétérogènes. » (Galati et al., 2019, p. 101).*

L'Industrie 4.0 est en voie de changer le monde du travail depuis son apparition grâce à l'Internet. La mise en place de nouvelles méthodes de formation de la SST pour les travailleurs doit être intégrée afin de faciliter le travail (Huba et al., 2016). En se basant sur l'automatisation, l'Industrie 4.0 se base sur la numérisation croissante de l'environnement de fabrication pour créer une chaîne de valeur numérique.

Cela permet la communication entre les produits, leurs environnements, les équipes de production et même les partenaires commerciaux (Galati et al., 2019). Si on considère l'Industrie 4.0 comme une Industrie 3.0 améliorée par le rôle de l'Internet, on va penser que le contrôle global du processus sera toujours et fortement centralisé et axé sur l'humain. L'Industrie 4.0 se focalisait sur l'automatisation et la simplification des processus grâce aux technologies numériques (Galati et al., 2019).

1.2.2 Caractéristiques de l'Industrie 4.0

Six principes ont été identifiés pour le déploiement et le développement de l'Industrie 4.0, ainsi que pour guider l'évolution des systèmes de production intelligents (Santos et al., 2017) :

- **Interopérabilité** : Fusion du monde physique avec le monde virtuel, c'est-à-dire que les systèmes, les personnes et les informations sont inters communiqués d'une manière transparente dans les systèmes cyberphysiques;
- **Capacité des opérations en temps réel** : Acquisition et traitement instantanés des données, ce qui permet une prise de décision en temps réel;
- **Virtualisation** : Réalisation et création des usines intelligentes, ce qui permet la traçabilité et la surveillance à distance de tous les processus grâce à plusieurs capteurs qui sont répartis dans l'atelier;
- **Décentralisation** : Les systèmes cyberphysiques sont déployés de manière à répondre aux exigences de production. Ces systèmes permettent une prise de décision en temps réel. Au lieu de simplement exécuter des commandes reçues, les machines peuvent également fournir des informations sur leurs propres cycles de travail;
- **Orientation des services** : Utilisation d'architectures des logiciels orientées services couplées avec le concept d'Internet des objets;

- Modularité : Processus de production en fonction de la demande, couplage et découplage des modules en production, ce qui donnera une flexibilité nécessaire pour changer facilement les tâches des machines.

En plus de ces principes, trois autres ont été rajoutés par la suite (Coito et al., 2019) :

- Visualisation : La conception et la disposition de l'interface entre les utilisateurs et les systèmes. Des frontaux applicatifs et des tableaux de bord doivent être clairs, flexibles, réactifs, rapides et faciles d'accès;
- Niveau d'accès : La gestion stricte de l'accès aux données aide à maintenir leur intégrité. Cette intégrité réduit les risques lors des transferts de données vers des entrepôts applicatifs;
- Gestion des connaissances : On ne doit pas réserver l'information ou les connaissances internes à des personnes précises. Il faut tenir compte de maintenir la documentation à jour et de faire circuler l'information.

1.2.3 Contexte économique de l'Industrie 4.0

Le passage à l'Industrie 4.0 modifie profondément la logique économique et les mécanismes traditionnels de création de valeur. Beaucoup de coûts sont réduits comme ceux du lancement des nouveaux produits (Blanchet, 2016). Les investissements des entreprises seront beaucoup mieux engagés, car le surcoût dans des équipements comme les cobots ou les véhicules autoguidés intelligents (VAI) sera compensé par une meilleure utilisation de l'ensemble de la chaîne (Blanchet, 2016). L'Industrie 4.0 permettrait de réduire les coûts de main-d'œuvre tout en améliorant la qualité et la valeur du produit. Le chiffre d'affaires augmente grâce à l'Industrie 4.0 à travers une meilleure utilisation de l'actif (comme la réduction du temps de maintenance et de changement de produits) (Blanchet, 2016). Selon le Ministère de l'Économie et de l'Innovation du Québec (MEI), les principaux défis auxquels les entreprises font face avec l'intégration de l'Industrie 4.0 sont nombreux.

Les principaux sont (MEI, 2018) :

- Les nouvelles compétences requises;
- La sécurité des données;
- Les besoins en investissement.

Les travailleurs devront alors s'adapter aux nouvelles compétences demandées par les entreprises adoptant le virage numérique, vu la croissance du besoin en main-d'œuvre spécialisée (Santos et al., 2017).

1.2.4 Technologies issues de l'Industrie 4.0

L'Industrie 4.0 suit une tendance de numérisation et d'échange de données par des technologies de fabrication comprenant des systèmes interconnectés et assez complexes, comme la cyberphysique, l'Internet des objets, ainsi que l'infonuagique (Huba et al., 2016). Galati et Bigliardi (2019) ont identifié quelques-unes des technologies de l'Industrie 4.0, notamment les systèmes cyberphysiques (CPS), la planification des ressources de l'entreprise (ERP), l'identification par radiofréquence (RFID), l'Internet des objets (IdO). Des chercheurs s'accordent à dire que ces derniers sont les piliers des avancées technologiques renforcées par l'Industrie 4.0 (Galati et al., 2019).

Les différentes technologies clés de l'Industrie 4.0 sont (Santos et al., 2017) :

- Internet des Objets (IdO) : Elle sert à mettre en réseau les objets physiques, les environnements, les machines et véhicules permettant la collecte et l'échange des données au moyen de dispositifs électroniques embarqués;
- Mégadonnées : dans le contexte de l'Industrie 4.0, ce sont des données qui sont générées par plusieurs sources (capteurs, contrôleurs des machines, les employés, etc.) parmi beaucoup d'autres. Ces données sont assez volumineuses, se transfèrent à grande vitesse et sous différents formats. Le traitement de ces mégadonnées est un élément clé pour l'innovation durable au sein d'une usine 4.0;
- Infonuagique : l'industrie basée sur les nuages de données peut être décrite comme une industrie en réseau avec des lignes de production cyberphysiques reconfigurables qui réduisent les coûts de production et améliorent l'efficacité;

- Cybersécurité : elle sert à protéger le savoir-faire de l'organisation intégré dans les fichiers de contrôle du traitement, vu la grande connectivité. La sécurité et la robustesse des systèmes d'information sont considérées parmi les défis majeurs pour le succès de l'Industrie 4.0 afin d'éviter les cyberattaques;
- Fabrication additive : un élément clé de la personnalisation de masse qui réduit le temps et les coûts de production pour créer des produits uniques;
- Réalité mobile augmentée : des appareils mobiles sont dotés de systèmes de positionnement fiables et moins coûteux qui permettent de représenter en temps réel le positionnement sur des cartes en 3D, ce qui permet d'utiliser des scénarios de réalité augmentée.

La combinaison des technologies issue de l'Industrie 4.0 entraîne un changement fondamental de paradigmes dans la production industrielle. La fabrication de produits personnalisés devra se réaliser en un seul lot, tout en maintenant les conditions économiques de la production de masse (Lasi et al., 2014). Ces différentes technologies communiquent et coopèrent en temps réel dans tous les services d'une entreprise, avec les fournisseurs et les clients. Cela a pour but de surveiller les systèmes physiques et d'agir à temps (Lasi et al., 2014).

L'intégration de l'IdO dans le processus de fabrication est considérée comme un élément clé de la quatrième révolution industrielle (Hermann et al., 2016). Il ne faut pas se concentrer seulement sur les nouvelles technologies et leurs intégrations, mais aussi sur la manière de les combiner et de les utiliser d'une nouvelle façon, en considérant trois niveaux d'intégration (Santos et al., 2017) :

- Interaction des objets cyberphysiques;
- Gestion des mégadonnées et modélisation des objets cyberphysiques;
- Services optimisés par les mégadonnées.

En effet, les systèmes cyberphysiques et la robotique jouent un rôle important pour la production intégrée. Malgré la mondialisation et l'automatisation, il y a toujours un besoin de la présence de l'être humain pour laisser au centre de cette révolution de l'Industrie

4.0. Ceci mène à donner une grande importance au cadre de qualification, ainsi qu'à la formation du personnel (Huba et al., 2016). L'importance de l'intégration de l'humain avec les machines est de décentraliser la prise de décision (Danjou et al., 2017). Selon Digmayer (2019), la transition vers l'Industrie 4.0 changera radicalement la manière de collaboration entre l'homme et la machine. Cela va mener à se poser de nouvelles questions concernant la façon de travailler de manière sûre et sécuritaire (Digmayer et al., 2019). Parmi les notions de l'Industrie 4.0 qui sont liées à l'humain, il y a l'opérateur 4.0. Il est défini comme « *un opérateur intelligent et compétent capable d'effectuer non seulement un travail coopératif avec les robots, mais aussi un travail assisté par des machines, si nécessaire. Et cela grâce au moyen de systèmes cyberphysiques humains, de technologies avancées d'interaction personne-machine et d'une automatisation adaptative vers des systèmes de travail en symbiose homme-automatisme* » (traduction libre) (Romero et al., 2016, p. 1).

Un opérateur 4.0 est dit en bonne état de travail, s'il utilise des solutions intelligentes portables ou traceurs portables pour des mesures liées à sa santé. Ces dispositifs portables possèdent des fonctionnalités d'analyse de données et intègrent des technologies avancées favorisant l'interaction personne-machine (IHM) ainsi que l'interaction homme-automatisme (IHA) (Romero et al., 2018). Ceci donnera la possibilité d'utiliser les données physiologiques (bio données). Selon Romero et al. (2018), ces solutions vont permettre de susciter des changements positifs non seulement en termes d'amélioration de la productivité, mais aussi du bien-être et des mesures de sécurité proactives sur les lieux de travail intelligents. Un travailleur doit être nécessairement examiné sur sa façon d'interagir et de collaborer avec les robots afin que la collaboration humain-robot (CHR) soit faite en toute sécurité (Kolbeinsson et al., 2019).

De nouvelles technologies peuvent aussi être mises en place pour évaluer les risques de façon plus fiable. Par exemple, il existe des capteurs portables qui surveillent et évaluent les risques de blessures au dos des travailleurs qui soulèvent de grosses charges (Pistolesi et al., 2020). Les capteurs aident à surveiller facilement en temps réel la santé des travailleurs dans un contexte d'intelligence ambiante (Romero et al., 2018). Aussi, des systèmes qui surveillent en permanence le niveau de sécurité des travailleurs produisent

des rapports visuels intuitifs. Ces rapports permettent au gestionnaire d'évaluer rapidement le risque, ce qui permettra de réduire les jours d'absence du travail en améliorant le niveau de sécurité des travailleurs (Pistolessi et al., 2020).

Pistolessi et Lazzerini (2020) prévoit qu'à l'avenir, les capteurs pourraient être remplacés par des dispositifs intelligents. Ils seront en mesure de détecter les activités à risques en temps réel. En effet, une alerte se déclenchera lorsqu'un travailleur effectuera un levage de façon incorrect, par exemple. L'alerte informe le travailleur immédiatement de son état avec des instructions personnalisées sur la façon d'accomplir la tâche en toute sécurité (Pistolessi et al., 2020). En outre, des technologies industrielles 4.0 comme des vêtements intelligents peuvent jouer un rôle important pour favoriser une meilleure hygiène industrielle. Le but est de maintenir la SST ainsi que la motivation des travailleurs dans les ateliers intelligents et sociaux émergents (Romero et al., 2018).

Des capteurs peuvent détecter les modèles de comportement humain, des fuites ou des accidents de travail. Dans une situation pareille, ils peuvent par exemple alerter dans l'immédiat le travailleur ou le service responsable afin de prévenir l'accident. Des robots peuvent être portés par les travailleurs pour prévenir les troubles musculosquelettiques et soutenir la force humaine (Min et al., 2019). Parmi les principales applications développées en matière de SST, on trouve : l'alerte des travailleurs en cas d'éventuelle exposition à des facteurs de risque tels que les toxines, les températures élevées ou les niveaux de bruits ; les arrêts d'urgence des machines lourdes ; la prévention des mouvements et postures anti-ergonomiques du corps afin d'éviter les tensions ou les blessures ; ainsi que la surveillance des charges de travail cognitives et physiques pour prévenir la surcharge mentale (Romero et al., 2018).

Selon Min (2019), il existe deux points de vue concernant le changement prévu de la SST, en contexte de l'Industrie 4.0. Tout d'abord, il y a un point de vue positif qui montre l'importance des nouvelles technologies qui peuvent être utilisées pour créer un environnement de travail sécuritaire et cela en excluant les humains des lieux de travail dangereux. Ensuite, on trouve un point de vue négatif qui se divise en trois parties (Min et al., 2019) :

- La mondialisation exerce une influence directe sur l'organisation et la gestion du temps de travail. Cette dynamique mondiale entraîne ce que l'on appelle une « compression de l'espace-temps », ce qui est une modification de notre perception et l'utilisation du temps en réponse aux exigences de l'économie globalisée. En raison de l'essor des technologies de l'information et de la communication, le rythme de travail est de plus en plus dicté par la demande économique plutôt que par les rythmes biologiques des individus. Cependant, cette désynchronisation entre les cycles biologiques naturels et les horaires de travail peut entraîner divers problèmes, tels que des perturbations dans le rythme de vie quotidien, un risque accru de cancer et d'autres maladies.
- L'automatisation qui prend charge des parties du travail engendre des inquiétudes chez de nombreux travailleurs, non seulement en ce qui concerne la sécurité de leur emploi, mais aussi leur rémunération. En effet, l'automatisation tend à affecter principalement des tâches simples et répétitives, alimentant les craintes liées au chômage et à la difficulté de retrouver un emploi.
- D'autre part, l'emploi devient instable lorsque les bénéfices tels que les pensions publiques, les congés de maladie, annuels ou de maternité ne sont pas garantis. L'absence d'opportunités pour la rotation des postes ou les promotions, ainsi que l'ignorance délibérée des droits humains, aggravent cette instabilité. En conséquence, cette instabilité accrue dans l'emploi peut augmenter le risque de troubles mentaux chez les travailleurs.

Selon Badri (2018) et Erol (2019), beaucoup de chercheurs ont déduit que si les nouvelles technologies se développent d'une manière fragmentée et que les décideurs en matière de SST sont désorganisés dans leurs propositions, les risques émergents seront de plus en plus importants. Ceci changera en défaut certains des avantages obtenus dans le contrôle des dangers (Badri et al., 2018; Erol, 2019). La collaboration des chercheurs, des industriels et des experts sur le terrain est demandée pour la mise en œuvre des mesures fondées sur une vision globale de gestion pour assurer une transition numérique en toute sécurité. La concentration sur les technologies de l'Industrie 4.0 provoquera une

multiplication des dangers sur le lieu de travail pendant les périodes de transition à cause de la négligence des initiatives en SST. Certains dossiers de prévention des accidents peuvent être alors ternis (Badri et al., 2018).

1.2.5 Défis de la SST en contexte de l'Industrie 4.0

L'adoption de l'Industrie 4.0, y compris l'utilisation accrue des véhicules à guidage automatique (AGV), peut avoir un impact positif en éliminant les tâches laborieuses et dangereuses dans les processus de travail (Marková et al., 2019). Toutefois, l'intégration des AGV et d'autres technologies de l'Industrie 4.0 peuvent également présenter des risques professionnels spécifiques.

Ces risques peuvent être inhérents à l'interconnexion des systèmes et des machines, à l'utilisation accrue des systèmes numériques et à la gestion des grandes quantités de données numériques (Digmayer et al., 2018). Les mégadonnées doivent être intégrées et analysées dans le processus de production industrielle qui deviennent de plus en plus complexes à traiter (Digmayer et al., 2019). L'intégration de la SST dans l'Industrie 4.0 permet de développer des robots sécurisés et reconnaissants des événements dangereux qui peuvent mettre en péril la sécurité des travailleurs (Beetz et al., 2015). Beetz et al. (2015) rajoute que cela apportera des avantages à court et à long terme pour les entreprises. L'intégration de la SST aura un effet globalement favorable sur la productivité et les coûts (Badri et al., 2018).

Il est clair que malgré les efforts législatifs, la mise en place de nouvelles normes et les procédures de gestion de la SST, cela ne fera pas disparaître tous les dangers au travail (Häkkinen, 2015). L'intégration des technologies de l'Industrie 4.0 va créer des complexités supplémentaires en plus des problèmes déjà existants. (Erol, 2019).

La nouvelle ère industrielle provoquera de nouveaux défis en matière de SST qui vont obliger les entreprises à dépenser encore plus (Digmayer et al., 2019). Les normes en SST aideront à s'adapter et à surmonter des obstacles comme les erreurs d'identification des dangers et la hiérarchisation des risques de SST, ce qui permettra de mieux migrer vers des processus plus autonomes et intelligents (Beetz et al., 2015). Si les aspects de SST

sont négligés dans les processus d'intégration des nouvelles technologies en milieu de travail, les dangers se multiplieront et certains gains réalisés en matière de prévention des accidents seront perdus (Badri et al., 2018).

L'évolution de la SST suit toujours le développement de l'industrie (Erol, 2019). Les nouvelles technologies introduites par l'Industrie 4.0 obligent à mettre en place de nouvelles approches d'analyse organisationnelle (MacDougall, 2014). Ces approches permettent d'adapter plus efficacement les pratiques managériales, y compris la SST. Les anciens outils d'évaluation des risques professionnels semblent être incapables de reconnaître ces nouveaux risques qui sont en évolution (Erol, 2019).

Les différentes technologies se développent de manière très rapide et il devient nécessaire pour les travailleurs de s'adapter. Cependant, il semble que la réduction du taux d'accidents de travail ne soit pas suffisante, tandis que la vitesse et la productivité industrielles augmentent parallèlement (Tasdelen et al., 2020). De nouveaux modèles d'analyse des risques devront être mis en œuvre afin de contrôler les risques conventionnels et émergents de la SST. En effet, les systèmes de production de l'Industrie 4.0 sont de plus en plus complexes, ce qui provoquera plusieurs types de dangers en milieu de travail. Par exemple, les risques psychosociaux sont souvent négligés par les ingénieurs et les concepteurs des systèmes de fabrication avancés. Ils présentent un défi majeur en termes de législation et de gestion en SST (Badri et al., 2018). La prévention des comportements dangereux est nécessaire pour réduire les accidents. Le travailleur peut adopter des comportements dangereux en raison d'effets psychologiques et mentaux (stress, anxiété, etc.) (Heinrich, 1931).

Il devient alors inévitable de se concentrer sur le rôle prépondérant des facteurs humains dans la survenance des accidents (Tasdelen et al., 2020). Les travailleurs peuvent ressentir au moins un ou plusieurs effets de fatigue périodiquement ou tout au long de la journée (Heinrich, 1931). Bien que la fatigue puisse ressembler aux caractéristiques du travailleur, les effets de cette dernière se manifestent en fonction des conditions et des circonstances dans lesquelles le travailleur se trouve (Tasdelen et al., 2020). Un système industriel intégrant un procédé de contrôle à distance comme l'Internet des objets (IdO) dans le but d'améliorer l'autonomie des machines ne sera plus soumis à des normes de SST

applicables à des générations précédentes (Erol, 2019). Les systèmes de gestion de la SST ont la réputation d'être des cadres insuffisamment flexibles (Badri et al., 2018). L'amélioration de l'agilité de ces systèmes les rendra mieux adaptés à des processus industriels de plus en plus complexes, flexibles et autonomes (Erol, 2019).

Les dangers professionnels doivent être identifiés grâce à une gestion rigoureuse de l'information avant d'entreprendre une action préventive ou corrective (Badri et al., 2012). La collecte des données devient plus facile à l'ère numérique, puisque les équipements ont désormais la capacité d'enregistrer et d'archiver de grandes quantités d'informations (Adem et al., 2020).

Le défi se présente dans la détermination des données réellement utiles pour améliorer la prévention des accidents. Il est devenu plus important de détecter et de prévenir les situations de travail à risque avant que les accidents ne se produisent (Sergio et al., 2020). La prévention est plus efficace que de procéder à des corrections et des analyses après un accident. Certaines études ont été réalisées sur la possibilité d'utiliser les concepts de l'Industrie 4.0 afin de mettre en place une gestion de SST plus efficace (Tasdelen et al., 2020).

Un des défis de la gestion des risques à l'ère de l'Industrie 4.0 est de surmonter les difficultés d'identification des dangers (Laciok et al., 2021). Les outils de gestion des dangers en temps réel deviennent également très pertinents dans les milieux industriels en changement (Podgórski et al., 2017). Ces outils s'appuieront sur des données recueillies à partir d'une multitude de dispositifs connectés ensemble. Les données recueillies sont souvent délocalisées et accessibles via Internet, ce qui soulève de graves problèmes liés à la cybersécurité (Tasdelen et al., 2020).

Le terme SST 4.0 est un terme utilisé pour décrire une approche proactive et préventive de gestion de la SST dans un contexte de l'Industrie 4.0. L'objectif de cette approche est de mettre en place un système de gestion des risques dans un environnement caractérisé par la présence des machines intelligentes. La SST 4.0 permet aussi un suivi de l'état de santé des travailleurs et d'emmagasiner ces informations dans des bases de données conçues pour contrôler et prévoir les risques. Les systèmes informatiques responsables de

l'état de santé des travailleurs doivent être protégés et sécurisés contre les cyberattaques. (Tasdelen et al., 2020).

Il est nécessaire d'effectuer des recherches axées sur les dangers professionnels émergents à tous les niveaux de production, sur l'amélioration de la responsabilité sociale des entreprises, sur la conception et la configuration des lieux de travail et sur l'utilisation efficace des technologies de l'information (Badri et al., 2018). Ces recherches ont pour but d'améliorer l'intégration du travail humain avec les équipements intelligents.

1.3 Véhicules autoguidés

1.3.1 Généralités

En général, un véhicule autoguidé est un robot de service qui doit fonctionner d'une manière autonome par navigation naturelle. Ce véhicule doit effectuer des opérations qui lui sont attribuées grâce à un système de contrôle (Cronin et al., 2019; Lynch et al., 2019). Le véhicule à guidage automatique (AGV) est défini comme un véhicule mobile autonome utilisé dans les environnements de fabrication et de distribution pour transporter et manipuler des marchandises sans intervention humaine directe (Eren Şenaras, 2019). Concernant les zones de fabrication, ils sont utilisés pour manutentionner tous les types de matériaux liés à la fabrication (Fazlollahtabar et al., 2015).

Ces véhicules peuvent s'adapter aux changements des processus de production, bien que leur capacité d'adaptation dépende de leurs fonctions de navigation autonome spécifiques. Les applications multiples des AGV comprennent des industries dans divers domaines : l'aérospatiale, l'automobile, les papeteries, la métallurgie, l'agriculture, les hôpitaux et tout système de transport ou de stockage (Archila et al., 2013).

La production industrielle moderne exige une capacité de transport avec une puissance très importante. Donc l'AGV est un bon choix comme outil, car il garantit un effort supérieur à celui de l'opérateur humain avec un rythme continu. Ce véhicule peut travailler sans interruption et peut transporter des objets de poids important, ce qui améliore considérablement l'efficacité du travail (Hu et al., 2017). Grâce au AGV, il sera possible

d'automatiser entièrement les flux de matériel entre plusieurs services (Correia et al., 2020).

La manutention des matériaux est un aspect important de l'automatisation de la fabrication (Fazlollahtabar et al., 2015). La fabrication d'un produit peut comprendre énormément d'étapes de traitement et l'utilisation d'un nombre important d'outils différents. Ce qui implique un niveau très élevé de déplacements.

Uttendorf et Eilert (2016) ont distingué différentes méthodes pour la navigation des AGV. En effet, ils sont soit guidés par des fils de guidage dans un atelier, soit grâce à une carte numérique pour laquelle aucune présence physique dans l'atelier n'est requise. Une carte routière doit être générée à l'avance dans les deux cas afin de remplir efficacement les tâches de transport données.

Le routage pour les AGV, présentement, est généralement réalisé manuellement par des planificateurs expérimentés. Une analyse d'une variété d'entrées, comme les différentes dispositions, la matrice de transport ou la cinématique des AGV sont nécessaires pour la réalisation de cette tâche (Uttendorf et al., 2016). De plus, la productivité d'un atelier de flux opérationnel desservi par des AGV (produisant de manière répétitive un ensemble de produits différents) dépend à la fois de l'enchaînement des tâches (comme le fait de maximiser la mise en place ou de minimiser le temps de cycle) et du système de manutention qui est requis pour atteindre un débit prédéfini (dimensionnement, affectation et planification de flotte d'AGV) (Bocewicz et al., 2014).

Les AGV sont des équipements qui peuvent aussi être utilisés pour des prises de décision décentralisées. On peut citer par exemple la planification des trajectoires et la prévention des collisions. Cependant, la planification des trajets semble nécessiter des calculs coûteux lorsqu'on utilise plusieurs AGV, et cette opération pourrait être déléguée à un processeur central puissant (Mehami et al., 2018).

La localisation et le routage de plusieurs AGV peuvent présenter des difficultés dans une usine. La mise en place du bon équipement dans l'usine sera certainement longue et

coûteuse, et des inefficacités et problèmes peuvent survenir du fait que ces AGV ne sont pas adaptés à un environnement dynamique (Mehami et al., 2018).

Il existe différents types de AGV. Ils sont regroupés en sept familles (KMC, 2021) :

- Chariots à guidage automatique;
- Remorqueurs à guidage automatique;
- Chariots élévateurs automatisés;
- AGV- transpalette à fourche;
- AGV à charge unitaire;
- AGV de l'extérieur;
- VAI, appelés aussi robots mobiles autonomes (RMA).

1.3.2 Utilité et importance des AGV

L'utilisation des AGV repose sur diverses méthodes mathématiques, lesquelles peuvent varier d'un chercheur à l'autre. Plusieurs architectures et modélisations sont proposées selon le besoin d'une entreprise. Un véhicule ne peut se déplacer qu'après avoir généré le chemin de référence à l'avance. Le superviseur remarque alors l'état du véhicule en analysant les données cinétiques transmises au serveur. Ceci permettra par la suite le déplacement du véhicule vers sa destination pour effectuer la tâche (Tran et al., 2018).

Pour optimiser la sécurité et l'efficacité dans des environnements complexes, il est bénéfique qu'un AGV dispose d'une classification fiable des obstacles et d'une connaissance globale de son environnement. Ceci permet d'implémenter des ajustements locaux dans le routage des AGV de manière sécuritaire (Cardarelli et al., 2015).

Pour une bonne intégration des AGV, il faut d'abord prendre en considération une estimation du nombre d'AGV à utiliser. Il faudra ensuite mesurer les trajets aller-retour et

le temps de déchargement. L'objectif qui suivra est de réduire les activités sans valeur ajoutée (exemple : distance parcourue à vide) (Correia et al., 2020).

Pour exécuter et utiliser ce genre de véhicule, il faut comme première étape mettre sous tension l'AGV après l'initialisation du système. Ensuite, une puce détermine s'il faut accepter les instructions du serveur (exemple : la puce STM32). Une fois les instructions acceptées, l'AGV va exécuter l'ordre. Sinon, il attendra alors la réception de la prochaine instruction (Hu et al., 2017).

La Figure 2.1 représente le flux principal de contrôle d'un AGV, selon Hu et Ke (2017) :

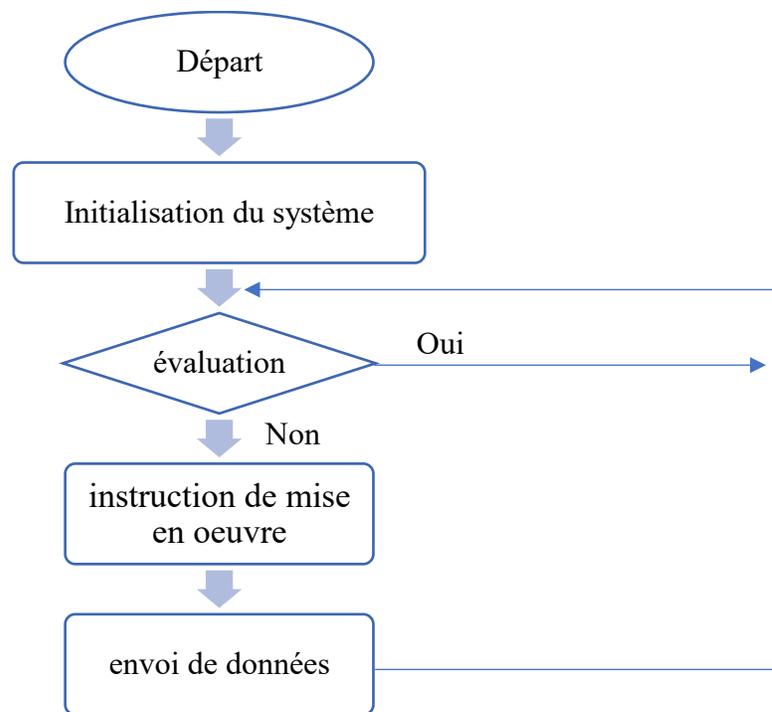


Figure 1.1: Flux principal de contrôle d'un AGV (Hu et al., 2017)

Il existe un système qui contrôle l'ensemble des AGV, nommé AGVS (Auto Guided Vehicle System). Il consiste en plusieurs AGV qui fonctionnent simultanément. La conception de ce système nécessite une prise de décision concernant les meilleures stratégies afin de résoudre différents problèmes liés à leur fonctionnement, comme l'acheminement, la répartition et la planification des AGV. Il faut choisir les bonnes

solutions de fonctionnement qui répondent le mieux aux exigences existantes imposées par le système de manutention des matériaux pour l'AGVS (Vivaldini et al., 2015).

L'AGVS est devenu un outil stratégique important pour les entrepôts automatisés. Ce système aide à augmenter la productivité et à réduire les coûts de transport. Il assure alors un flux et une distribution efficaces des matériaux entre les postes de travail, au bon moment et au bon endroit (Vivaldini et al., 2015). Afin de satisfaire ces exigences, l'AGVS implique la répartition des tâches, la programmation et l'acheminement des AGV (Vivaldini et al., 2015).

Afin de répondre le plus rapidement possible aux demandes de transport en évitant des conflits, dans un délai imparti, il est important de mettre en place une politique de gestion de l'AGVS. Des chercheurs ont défini la fonction de gestion de l'AGVS dans trois domaines, soit : la répartition, l'acheminement et l'ordonnancement. « *La répartition est le processus de sélection et d'attribution des tâches aux véhicules, l'acheminement est la sélection des trajets spécifiques que chaque véhicule exécutera pour accomplir ses tâches de transport, et l'ordonnancement est la détermination des heures d'arrivée et de départ des véhicules à chaque segment de leur parcours pour assurer un déplacement sans collision* » (traduction libre) (Vivaldini et al., 2015, p. 507).

Selon Vivaldini et al. (2015), ce système de contrôle des AGV doit garantir la coordination entre les celles-ci, au niveau des horaires et de l'acheminement du matériel, en assurant un fonctionnement efficace du système (pas de conflit ni de collision ou de blocage) indépendamment du nombre de véhicules utilisés.

Selon Correia et Teixeira (2020), les étapes suivantes doivent nécessairement être déterminées afin d'empêcher l'arrêt de la chaîne de montage :

- Nombre d'AGV nécessaire;
- Vitesse appropriée des AGV;
- Positionnement des AGV actifs et inactifs;

- Capacité des AGV;
- Lieux de chargement et déchargement;
- Tâches associées à l'utilisation des étiquettes électroniques qui sont employées pour transmettre des ordres aux AGV.

Correia et Teixeira (2020) mentionnent que le choix de l'emplacement des points de ramassage et de livraison est important, car il influence la performance opérationnelle. L'objectif sera de réduire le temps d'attente des chargements et la distance parcourue en évitant les goulots d'étranglement aux points de ramassage et de livraison.

Pour le fonctionnement d'un bon système d'AGV, il faut respecter les conditions suivantes (Correia et al., 2020) :

- Exigences relatives : Le bon fonctionnement du système exige un nombre suffisant de véhicules, car le nombre de véhicules influence fortement la performance des systèmes AGV.
- Répartition : Les règles de répartition doivent être utilisées lors de la sélection des véhicules à transporter tout en choisissant les véhicules les plus favorables pour une bonne performance.
- Itinéraire et programmation : Un AGV convient de planifier un itinéraire et un horaire lorsqu'il est affecté à une tâche.
 - L'itinéraire indique le chemin que l'AGV doit emprunter lors d'un ramassage ou d'une livraison;
 - L'horaire indique les heures d'arrivée et de départ de l'AGV à chaque segment, les points de ramassage et de livraison et aussi l'intersection pendant le trajet afin d'assurer un acheminement sans collision.

- Positionnement au ralenti : L'emplacement des véhicules au ralenti doit être défini de manière que les temps d'attente des chargements pour le transport soient faibles. Cela permettra aux AGV de réagir rapidement aux besoins.
- Gestion des batteries : Les batteries sont considérées et utilisées comme un système de ravitaillement pour les AGV. La batterie doit être chargée ou changée après un certain temps.

La négligence du moment de recharge ou changement aura une incidence sur les performances du système (véhicules sans énergie, vitesse inappropriée, cogestion, etc.).

- Gestion des défaillances : La probabilité de congestion sera faible et son apparition sera inaperçue sur les performances du système si le nombre d'AGV utilisé est faible.

1.3.3 Technologies et conception des AGV

Il y a deux types de technologies de guidage d'un AGV : les méthodes de guidage à itinéraire fixe et celles à itinéraire libre (Mehami et al., 2018).

- Le guidage à itinéraire fixe compte sur un trajet tracé afin que l'AGV puisse détecter son chemin et le suivre (bandes magnétiques et optiques);
- Le guidage à itinéraire libre enregistre les coordonnées que l'AGV utilise pour identifier sa position actuelle (GPS ou guidage par vision).

Pour résoudre les problèmes d'acheminement des AGV dans les zones de fabrication, des algorithmes ont été développés. Ces algorithmes peuvent être catégorisés comme « statiques » ou « dynamiques ». Les algorithmes statiques sont conçus avec des paramètres prédéfinis qui ne changent pas durant le processus d'acheminement, tandis que les algorithmes dynamiques ajustent leurs paramètres en temps réel en réponse aux changements dans l'environnement de fabrication. Ces approches algorithmiques, utilisées en conjonction avec des modèles de réseau, des réseaux de files d'attente, des

simulations et des techniques d'acheminement intelligentes, facilitent un acheminement efficace et sans problème des AGV (Fazlollahtabar et al., 2015).

La fusion de données joue un rôle essentiel pour les AGV. Elle permet de mettre en place une stratégie de navigation avancée et sécuritaire, cela en fournissant aux AGV des informations constamment mises à jour sur le milieu de travail réel. La fusion de données consiste à rassembler toutes les données provenant de différentes sources, les fusionner et les transmettre au système de contrôle de l'AGV (Cardarelli et al., 2015).

La conception d'un AGVS soulève de nombreuses préoccupations dont la conception du trajet, l'estimation du nombre de véhicules requis, la programmation de ces véhicules, leur positionnement au ralenti, la gestion des batteries, l'acheminement des véhicules et la résolution des blocages (Correia et al., 2020).

D'après Correia et Teixeira (2020), plusieurs facteurs doivent donc être pris en considération lors de la conception d'un AGVS, dont le budget disponible, les quantités à déplacer, les marchandises à manipuler, la distance à parcourir et le type de système de production de l'entreprise à desservir. De plus, des questions tactiques et opérationnelles se posent et doivent être prises en compte lors de la conception d'un AGVS dont le déplacement de l'AGV (unidirectionnel ou bidirectionnel) et la gestion du trafic afin de prévoir et éviter des collisions et des impasses.

Concernant le système de conception d'un AGV, Hu et Ke (2017) ont montré l'ensemble des parties d'un AGV. Ils ont séparé cet ensemble en trois parties : le principe de fonctionnement, le matériel informatique (*hardware*) et la conception des logiciels (*software*).

Ces trois parties se décrivent comme suit (Hu et Ke, 2017) :

- Principe de fonctionnement : Un AGV est composé d'un équipement de guidage électromagnétique. Il est capable de se déplacer le long d'un chemin de guidage prédéterminé. Il dispose aussi de diverses protections de sécurité lors de la manutention de matériaux à un endroit désigné. Cela est grâce à l'AGVS qui est

responsable de l'attribution des tâches, de la programmation des véhicules, de la gestion des trajets et d'autres fonctions.

- **Matériel informatique :** L'AGV se compose de deux parties. La première partie est le corps de l'AGV et la deuxième partie est la section de contrôle. Le corps d'un AGV comprend le support, quatre pneus, deux arbres de liaison et un dispositif antichoc. Une « puce maîtresse » est installée dans le véhicule, agissant comme son cerveau. Elle envoie des signaux au système de conduite et facilite la communication avec les autres véhicules et le serveur.

Aussi, des composantes électriques sont mises en place afin de surveiller l'état de fonctionnement du véhicule et la renvoyer au contrôleur. L'information est ensuite téléchargée par le serveur. Parmi les composantes du matériel, il y a aussi le circuit d'entraînement du moteur, le circuit de communication sans fil, le circuit de capteur électromagnétique et la plaque de fond.

- **Conception des logiciels :** La puce qui permet de se connecter au serveur et valider les instructions fait partie de la famille STM32, utilisant le langage de programmation C. Il existe aussi un autre type de programmation qui se fait sur un microcontrôleur de la famille MCS 51. La programmation du STM32 est différente de celle du MCS 51.

1.3.4 Véhicules autoguidés intelligents

Les AGV ont permis de résoudre certains problèmes, malgré les problèmes induits par l'utilisation des AGV, comme l'augmentation de la pollution dans une zone confinée à cause du moteur à combustion interne qu'utilise le système d'AGV et la négligence de la gestion des pannes pour ce système de transport. En effet, si un AGV tombe en panne en plein milieu de travail, il bloquera le passage des autres véhicules (Zaghdoud et al., 2012).

Un système de transport innovant, à la fois sécuritaire et intelligent, a été introduit pour aborder et résoudre les défis et problèmes rencontrés des AGV (Zaghdoud et al., 2012). C'est un système qui peut s'adapter aux exigences spécifiques de l'environnement et améliorer la gestion du trafic et l'optimisation de l'espace intérieur. Ce type de véhicule

est différent d'un AGV. Il s'agit d'un véhicule intelligent qui peut se déplacer de manière autonome et qui est adapté pour réagir à différents obstacles. Il est nommé véhicule autoguidé intelligent (VAI) et ses caractéristiques dites intelligentes sont inspirées à l'origine de celles de l'AGV.

Selon Lynch et al. (2019, p.1685), un VAI se caractérise en quatre domaines technologiques fondamentaux, à savoir : la perception et la modélisation de l'environnement, la localisation et la construction de cartes, la planification de la trajectoire et la prise de décision, ainsi que le contrôle des mouvements.

Ces domaines clés englobent diverses technologies et méthodologies essentielles au fonctionnement efficace des VAI (Lynch et al., 2019). Les VAI sont considérés comme successeurs des AGV. Un VAI peut aussi être appelé un robot intralogistique selon l'Association des industries robotiques (Cronin et al., 2019).

Un véhicule intelligent autonome (VIA) peut aussi être utilisé pour remplacer les convoyeurs droits, si des postes de travail sont reconfigurés en un système modulaire. Un VAI nécessite des informations qui ne sont pas requises par un système linéaire traditionnel (charge utile à collecter, lieu, destination et délai de livraison) (Lynch et al., 2019).

Une flotte de VAI est requise pour travailler en conjonction avec le MES (Manufacturing Execution System). Leur communication se fait sans fil (réseau sans fil sécurisé au sein d'une installation). Un MES est définie comme suit : « *Un MES fournit des informations qui permettent d'optimiser les activités de production depuis le lancement de la commande jusqu'aux produits finis* » (traduction libre) (Lynch et al., 2019, p. 1684). De plus, un VAI est capable de déterminer la meilleure façon de naviguer entre deux endroits dans un environnement en constante évolution. Les obstacles imprévus ou les routes bloquées doivent être pris en compte et partagés (Lynch et al., 2019).

Bien que les AGV soient considérés comme les premiers véhicules sans conducteur, robustes et adaptés à de nombreuses opérations et applications, il est important de ne pas les confondre avec la robotique industrielle. L'intégration des AGV permet à l'opérateur

de se concentrer uniquement sur des tâches nécessitant des capacités intellectuelles significatives (Cronin et al., 2019).

Cependant, il est important de noter que les VAI offrent une flexibilité accrue, en réduisant le besoin de systèmes de convoyeurs fixes et monofonctionnels. Ils sont capables de transporter des unités de production d'une cellule à une autre de manière efficace. Originellement développés pour la production électronique, les VAI représentent une évolution significative dans les domaines de la robotique de service et de l'intralogistique (Cronin et al., 2019).

Le Tableau 2.1 résume quelques différences entre un VAI et un AGV (Hellmann et al., 2019).

Tableau 1.1 : Différence entre un AGV et un VAI (Hellmann et al., 2019)

| AGV | VAI |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Véhicule contrôlé par un ordinateur; - Se déplace sur le sol d'une installation sans opérateur à bord; - Il suit des trajets fixes préprogrammés; - Mouvement dirigé par une combinaison de logiciels et de systèmes de guidage basés sur des capteurs; - Incapacité de détourner des obstacles. | <ul style="list-style-type: none"> - Véhicule intelligent qui fait partie des technologies les plus récentes; - Pas de besoin de guidage; - Déployé rapidement sans avoir besoin de réaménager l'espace de travail; - Fonctionne de manière autonome; - Il réagit aux obstacles; - Communique et s'adapte aux environnements dynamiques; - Il permet de planifier des itinéraires alternatifs; - Travaille en collaboration au sein d'une flotte; - Sélection automatique et dynamique du véhicule optimal à expédier. |

Cronin et Conway (2019) ont distingué trois types de VAI selon les coûts qu'une entreprise pourra dépenser. En effet, il y en a les VAI à coût élevé, les VAI à coût intermédiaire et les VAI à coût faible. Chaque type de VAI est défini par trois caractéristiques, à savoir : la navigation du véhicule, la capacité de l'utilisateur et la sécurité. La sécurité n'est intégrée que sur les VAI à coût élevé. Ces caractéristiques diffèrent selon les gammes des véhicules (à coût élevé, intermédiaire ou faible) (Cronin et al., 2019). Pour les VAI à coût élevé, les caractéristiques peuvent être détaillées comme suit :

- Navigation : Le véhicule fait varier la lumière artificielle dans l'environnement de l'usine. Le but est d'analyser l'environnement de travail pour éliminer les erreurs dues à des changements, cela en maintenant des opérations précises et en choisissant toujours le chemin le plus court pour atteindre ses points de collecte et de dépôt.
- Capacité de l'utilisateur : Concerne la gestion de la flotte, la hiérarchisation des tâches, la communication avec le MES et le planificateur mobile. Ces capacités offrent une flexibilité dans certains processus et flux de matériaux.
- Sécurité : Une gamme complète de normes de sécurité qui respectent les principes de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) est offerte. Le véhicule peut détecter un obstacle et ralentir de manière appropriée ou s'arrêter. Il dispose d'un laser inférieur pour éviter de rouler sur un objet. Il dispose aussi d'un laser latéral qui prévient des collisions latérales et peut définir des paramètres permettant d'obtenir une largeur minimale de passage ou des distances minimales par rapport à un objet ou à une personne. Le véhicule contient un capteur de sécurité de proximité qui signale un emplacement précis (capteur infrarouge du pare-chocs avant). Le laser arrière permet aussi au VAI d'éviter de rouler sur un objet.

Pour les VAI à coût intermédiaire, les caractéristiques peuvent être détaillées comme suit :

- Navigation : Le véhicule fait une navigation par système d'exploitation de robot (ROS). Il permet de faire une configuration compacte et facilement reconfigurable. Le véhicule est doté de deux numériseurs laser qui offrent des capacités de navigation précises et efficaces. Le robot intérieur standard possède des lasers avant et arrière qui offrent une navigation en deux dimensions.
- Capacité de l'utilisateur : Comprend un système robotique compact, de qualité industrielle, omnidirectionnelle et entièrement autonome, une robotique intérieure ou extérieure selon le besoin ainsi qu'une architecture de sécurité renforcée.

Pour les VAI à faible coût, les caractéristiques peuvent être détaillées comme suit :

- Navigation : Ce véhicule est supporté par le ROS natif. Le robot n'est pas une solution prête à l'emploi (il doit être configuré par des ingénieurs). Il y a une possibilité d'intégrer des télémètres de 5 à 60 mètres et des capteurs 3D afin d'éviter des obstacles, de cartographier et de naviguer.
- Capacité de l'utilisateur : Comprends un système de contrôle, un système de suivi au laser, un système de navigation et une surface utilisateur IHM (interface personne-machine).

1.3.5 VAI de désinfection ultraviolet

a) *L'ultraviolet*

Utilisés fréquemment dans les secteurs industriels, médicaux et dentaires, les rayons ultraviolets (UV) sont notamment réputés pour leurs propriétés antibactériennes, servant à éliminer les bactéries, à créer un effet fluorescent ou à induire un bronzage (CCHST, 2016). Les VAI de désinfection utilisent souvent la technologie des UV. L'ultraviolet est un type de rayonnement non visible, émis tant par des sources naturelles comme le soleil, que par des sources artificielles. Toute forme de vie a besoin d'être exposée au rayonnement UV pour demeurer en bonne santé, car les UV stimulent la production de vitamines D dans le corps. Cependant, ces rayons ont des effets négatifs qui peuvent être dangereux (CCHST, 2016). Les UV font partie de la famille du spectre électromagnétique comme représenté dans la Figure 2.2.

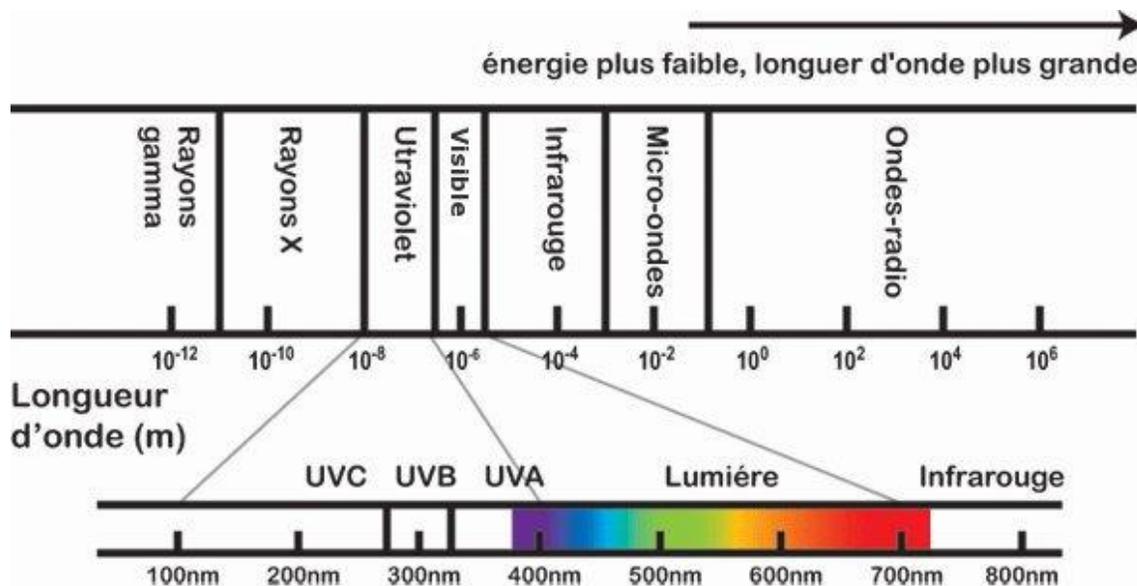


Figure 1.2 : Spectre électromagnétique (Canada, 2017)

Ces rayons UV ont des effets négatifs sur la santé et leur énergie est plus importante que celle de la lumière visible qui nous permet de voir. Les rayons UV ont une longueur d'onde comprise entre 100 nm et 400 nm. Ces rayons se divisent en trois bandes (Canada, 2017) :

- **Les UVA :** Ces rayons sont utilisés pour le bronzage immédiat et peuvent être responsables du vieillissement prématuré de la peau en pénétrant dans le derme. Les UVA peuvent être à la source de certains cancers de la peau. Ils ont une longueur d'onde entre 320 nm et 400 nm.
- **Les UVB :** Ces rayons brûlent en pénétrant dans la couche protectrice de l'épiderme. Ils sont responsables du bronzage à long terme et de la plupart des cancers de la peau. Ces rayons ont une longueur d'onde entre 280 nm et 320 nm.
- **Les UVC :** Ces rayons sont très dangereux pour la santé et ne peuvent pas traverser la couche d'ozone. Ils sont produits artificiellement afin de se débarrasser des bactéries. Ces rayons ont une longueur d'onde entre 100 nm et 280 nm.

Les UVC se divisent aussi en deux types, la première partie des UVC (germicide) contient des radiations capables de tuer les bactéries, champignons et micro-organismes. Ils ont une longueur d'onde entre 220 nm et 280 nm. La longueur d'onde considérée la plus efficace est de 253.7 nm.

La deuxième partie des UVC (Ozone) contient des radiations qui transforment l'oxygène en ozone dans l'air et ils ont une longueur d'onde entre 180 nm et 220 nm (Laliberté, 1996). Les UVC sont très utilisés de nos jours afin de neutraliser et éliminer la propagation de la nouvelle souche de la famille de Coronavirus (CoVs).

b) *Technologies de la désinfection UV*

La désinfection par le rayonnement UV est une technologie sans produits chimiques. Elle a été adoptée rapidement en raison de son efficacité dans le contrôle de la croissance microbienne. Cette technique est efficace dans divers environnements (eau, air ou sur les surfaces). Le mécanisme fondamental de l'efficacité des UV repose sur l'absorption de ces rayons par les micro-organismes. La sensibilité de leur matériel génétique à la longueur d'onde des UV est cruciale, ce qui rend la technologie efficace pour inhiber la prolifération des microbes (Raeiszadeh et al., 2020).

La Figure 2.3 illustre comment le système génomique des micro-organismes peut être endommagé.

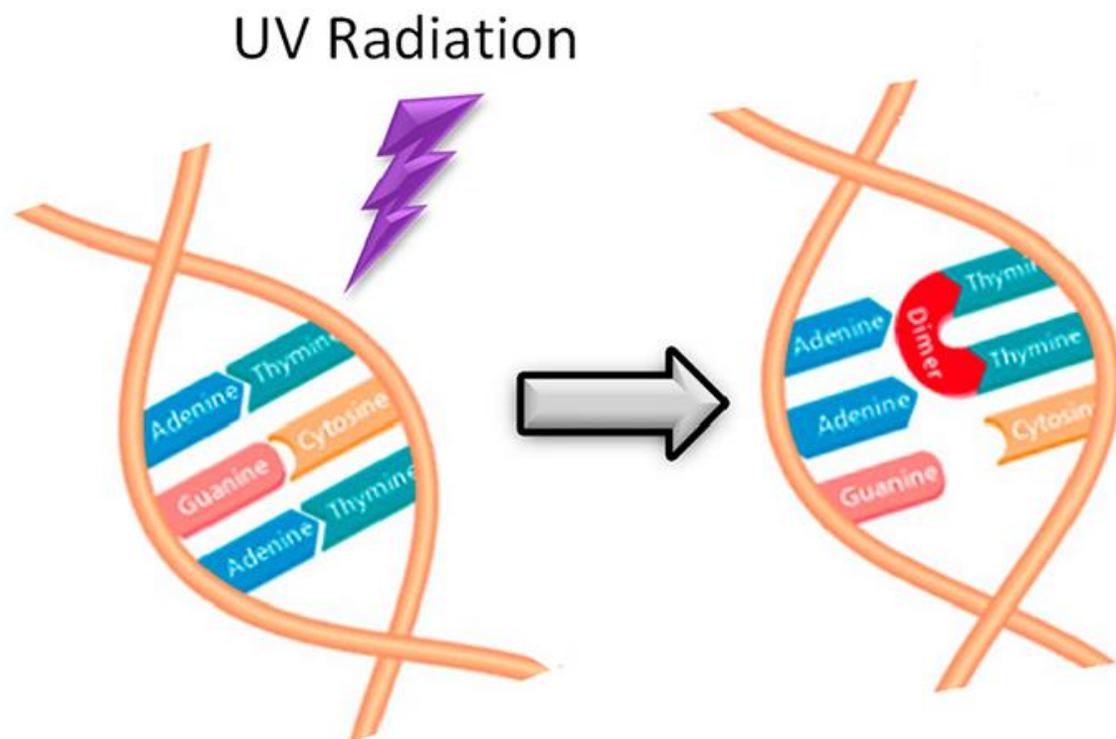


Figure 1.3: Dimérisation de la thymine pour un ADN (Acide désoxyribonucléique) double-brin exposé au rayonnement UV (Raeiszadeh et al., 2020)

Le dimère de pyrimidine est une liaison covalente générée entre deux adénines empêchant la cellule de se répliquer. L'effet de l'irradiation UV sur les micro-organismes est appelé « inactivation » et non « destruction ». La désinfection UV est un processus basé sur l'énergie où le taux d'inactivation est déterminé par la dose d'UV appliquée via l'unité de désinfection (Raeiszadeh et al., 2020).

Parmi les dispositifs émetteurs de rayons UV on peut citer : les lampes germicides, l'arc à charbon, au xénon, aux halogénures métalliques ou à vapeur de mercure, les pistolets à plasma et les appareils de polymérisation dentaire (CCHST, 2016). Plus précisément, le type du rayonnement utilisé est l'UVC (une longueur d'onde entre 200 et 280 nm) qui est une technologie très efficace pour inactiver le virus sur des surfaces lisses, dans les liquides clairs si la cible est à proximité de la source du rayonnement (Zuber et al., 2020).

L'UVC, avec une longueur d'onde entre 207 et 222 nm, est capable d'endommager les protéines à la surface du virus afin de les empêcher de se fixer sur les cellules humaines, ce qui peut réduire la contamination virale grâce à son action sur les surfaces et la colonne d'air (Lauritano et al., 2020). En effet, les composants intercellulaires des microbes comme l'ADN et les protéines absorbent de manière sensible les photons UVC. Cette absorption cause des dommages au système génomique des micro-organismes qui les empêchent de se répliquer et de survivre (Raeiszadeh et al., 2020).

Les robots de désinfections UV ont l'efficacité d'éliminer du SARS-CoV-2. D'après Raeiszadeh et al. (2020), il y a une augmentation des achats en ligne de divers articles de désinfection par UV comme les articles personnels, les téléphones portables ou les outils portatifs de désinfection de surface. Pour le traitement de l'air, des systèmes de désinfection par UV sont soit intégrés dans le système de climatisation central d'un bâtiment, soit utilisés comme dispositif individuel de purification de l'air pour un usage domestique ou personnel (Raeiszadeh et al., 2020).

Différentes sources d'UVC à base de lampe ont été utilisées en recherche et en industrie. La Figure 2.4 présente la répartition spectrale de puissance (RSP) des différentes sources d'UVC où chaque source génère différemment les longueurs d'onde de pointe (Raeiszadeh et al., 2020).

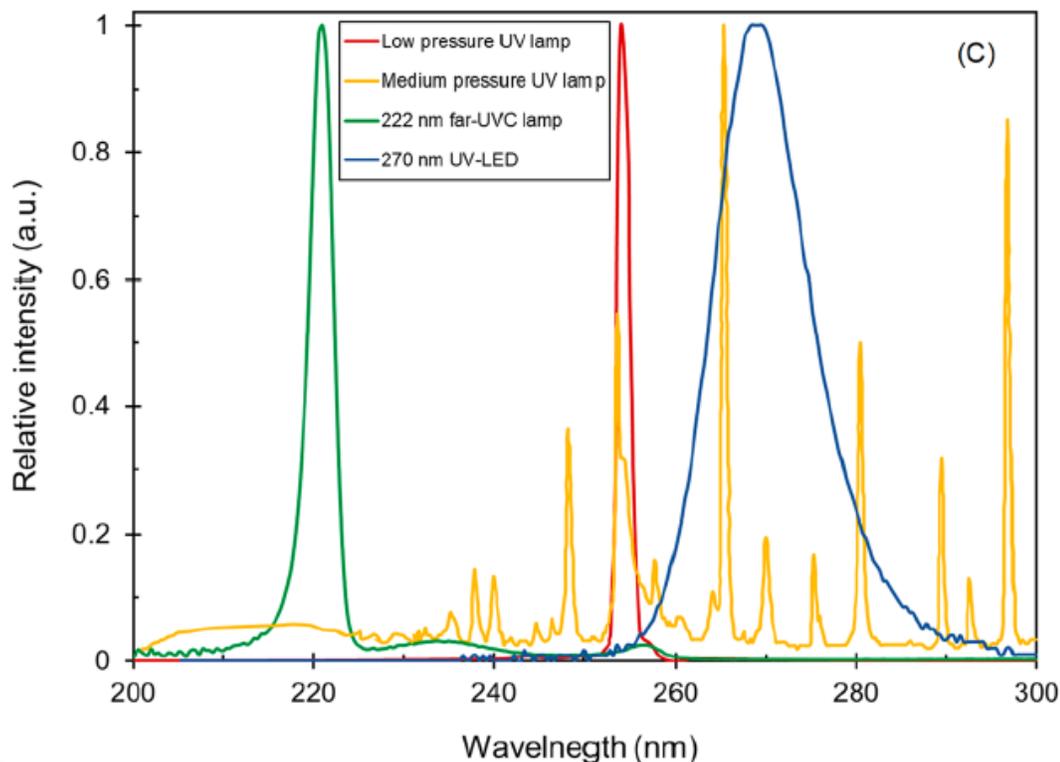


Figure 1.4 : Échantillon de répartition de puissance spectrale pour différentes sources d'UVC (Raeiszadeh et al., 2020)

Les lampes UV peuvent être installées sur différents outils ou technologies afin de faciliter la désinfection (dans un milieu hospitalier par exemple). Parmi ces technologies, il existe les véhicules autoguidés autonomes qui peuvent utiliser ces lampes (Bačík et al., 2020).

c) *Exemple de VAI conçu pour la désinfection UV*

La conception d'un véhicule autoguidé intelligent doit démontrer sa fiabilité et sa sécurité. Il faut vérifier si le fonctionnement des différentes parties du véhicule est sécuritaire (Bačík et al., 2020). Utiliser des tests sur le terrain est aussi requis pour que le véhicule soit suffisamment fiable (Asljung et al., 2017). Trois différents concepts de sécurité ont été proposés pour concevoir un environnement sécuritaire pour le véhicule, à savoir l'anneau de sécurité pour une détection fiable des objets, une navigation sécuritaire et une sensibilisation à l'environnement (Papa et al., 2018). Ces concepts n'ont pas été mis en œuvre et leur évaluation mutuelle fait toujours défaut (Bačík et al., 2020).

Plusieurs méthodes ont été étudiées dans différents articles, comme la dérivation quantitative du risque de collision avec les stratégies de contrôle de vitesse pour une navigation intérieure sécuritaire (Chung et al., 2009). Une étude de mouvement sécuritaire et robuste des véhicules a été réalisée. Cela a permis d'obtenir des scénarios optimisés et sécuritaires dans un environnement complexe, par la combinaison de la méthode de l'arbre aléatoire d'exploration rapide (*Rapidly-exploring Random Tree RRT*) à taille variable (Wang et al., 2019).

Une autre approche de sécurité a été étudiée, en utilisant des flux de nuages ponctuels de détection et de télémétrie par la lumière (LiDAR) et une méthode améliorée basée sur la segmentation. Par exemple, cela permet de détecter les personnes qui marchent sans regarder dans un milieu de travail. Ces personnes ne font pas très attention à leurs entourages (Wu et al., 2020). Cette méthode permet au VAI de reconnaître et d'éviter les piétons équipés de smartphones et donc de naviguer en toute sécurité (Bačík et al., 2020).

Bačík et Tkáč (2020) ont étudié la sécurité des personnes en mettant en place différents ensembles et composants. Pour la distance de sécurité, des numériseurs sont mis en place de façon à ce qu'aucune pièce ou composant n'interfère avec le champ de mesure actif de chaque numériseur laser dans les zones de sécurité. Cela permet de déterminer la distance de freinage. Concernant la sécurité par rapport au rayonnement UV, le véhicule de désinfection doit être composé d'un avertisseur qui s'allume quelques secondes avant d'émettre la lumière afin d'avertir les opérateurs et les autres personnes de quitter les lieux et de ne pas y entrer pendant la désinfection. Il doit être équipé d'un détecteur humain qui éteint les radiateurs germicides pour empêcher l'exposition d'une personne aux rayons UV en cas de détection (Bačík et al., 2020).

1.3.6 Risques SST liés aux VAI

Selon la CNESST, les catégories de risques qui peuvent être issues de l'utilisation des AGV sont : les risques physiques, technologiques, environnementaux, ergonomiques, psychosociaux et mentaux. Chaque type d'AGV peut contenir des risques spécifiques en plus des risques généraux (KMC, 2021).

a) ***Risques physiques***

Le risque de collision existera tant que l'humain se trouvera sur le même terrain que les AGV (Jocelyn et al., 2017; INRS, 2018). La collision entre les travailleurs et les AGV peut arriver à cause des inattentions humaines (CSST, 2011; CNESST, 2017). Il existe un risque de chute pour le travailleur, s'il croise le chemin d'un AGV de petite dimension (INRS, 2018). Ensuite, il existe diverses causes de problèmes liés à la circulation des AGV, malgré l'utilisation de caméras et autres technologies, telles que les télémètres laser, conçues pour assurer une navigation sécurisée. Si un travailleur se trouve dans une zone aveugle, l'AGV sortira du couloir sans détecter sa présence derrière le rayonnage, ce qui provoquera un accident comme présenté dans la Figure 1.5 (Bouliane et al., 2011; INRS, 2018). Les opérations de remorquage impliquent également divers risques associés au transport, comme spécifié par l'INRS (2018). L'AGV ne se rend pas compte de ce qui se passe entre les chariots liés à ce dernier par-derrière. Le véhicule ne peut pas détecter si un travailleur se retrouve entre deux chariots alors qu'il est en mouvement (KMC, 2021). Ce risque provoquera des dommages, tels que les blessures ou même le décès de cette personne (INRS, 2018). Un VAI est capable d'éviter les obstacles (Hellmann et al., 2019). En revanche, le véhicule peut interagir par la suite avec un travailleur ou un autre véhicule (KMC, 2021).

Concernant la manutention des objets ou des produits, le risque de leurs chutes sera toujours présent s'ils sont mal disposés. Une mauvaise fixation des objets sur l'AGV, que ça soit avec ou sans un arrêt brusque, risque de faire tomber les produits vers l'avant (INRS, 2018). Une collision entre deux AGV ou des produits déposés de façon incorrecte sur les AGV risque de provoquer leurs chutes (Laberge et al., 2018). Les produits mal entreposés en hauteur ou sur un AGV sont parfois dangereux pour la santé des travailleurs. Ils peuvent causer des explosions ou produire des événements dangereux lorsqu'on s'expose à cette matière (respiration, contact, etc.). Les dommages potentiels peuvent être des blessures légères ou graves, des brûlures ou même provoquer la mort (INRS, 2018).

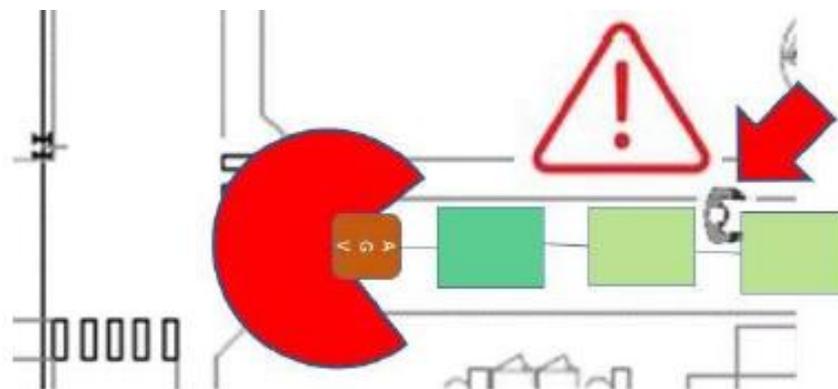


Figure 1.5 : Représentation d'un cas de travailleur entre deux chariots reliés (KMC, 2021)

Une mauvaise conception entraîne aussi des risques. Il est donc important de prendre en considération l'analyse des risques lors de la conception (Chinniah et al., 2008).

Parmi les risques spécifiques, il y a l'exposition aux rayonnements ultraviolets (UV). Ce risque est pris en considération pour les véhicules conçus pour la désinfection des particules microbiennes.

- **Risques liés à l'utilisation des UV :**

Les UV ont de nombreux effets négatifs sur la physiologie de la peau et les yeux. Le rayonnement UV est considéré comme un cancérigène puissant, étant donné qu'il est mutagène et qu'il cause des dommages de manière indiscriminée, affectant divers types de cellules et de matériaux. Il possède les propriétés d'un initiateur et d'un promoteur de tumeur (Raeiszadeh et al., 2020). L'exposition de la peau ou des yeux aux UV comprend une irradiation directe en plus de l'exposition due à la réflexion des rayons par les surfaces du milieu (CCHST, 2016). Selon le gouvernement du Canada (2016), il n'existe pas de limite d'exposition réglementaire en milieu de travail au Canada. Mais selon « American Cancer Society, American Conference of Governmental Industrial Hygienists et l'Agence européenne pour la sécurité et la santé au travail », il existe une valeur limite de seuil (VLS) pour l'exposition humaine aux rayonnements UV qui est une dose d'UV effective de 3 mJ/cm^2 dans un intervalle de 8 h (irradiation x temps d'exposition) (Raeiszadeh et al., 2020).

La base de la sensibilité maximale de l'œil humain est de 270 nm pour la dose UV effective. La Figure 2.6 représente la VLS pour l'exposition humaine aux UV sur le spectre UVC (Raeiszadeh et al., 2020) :

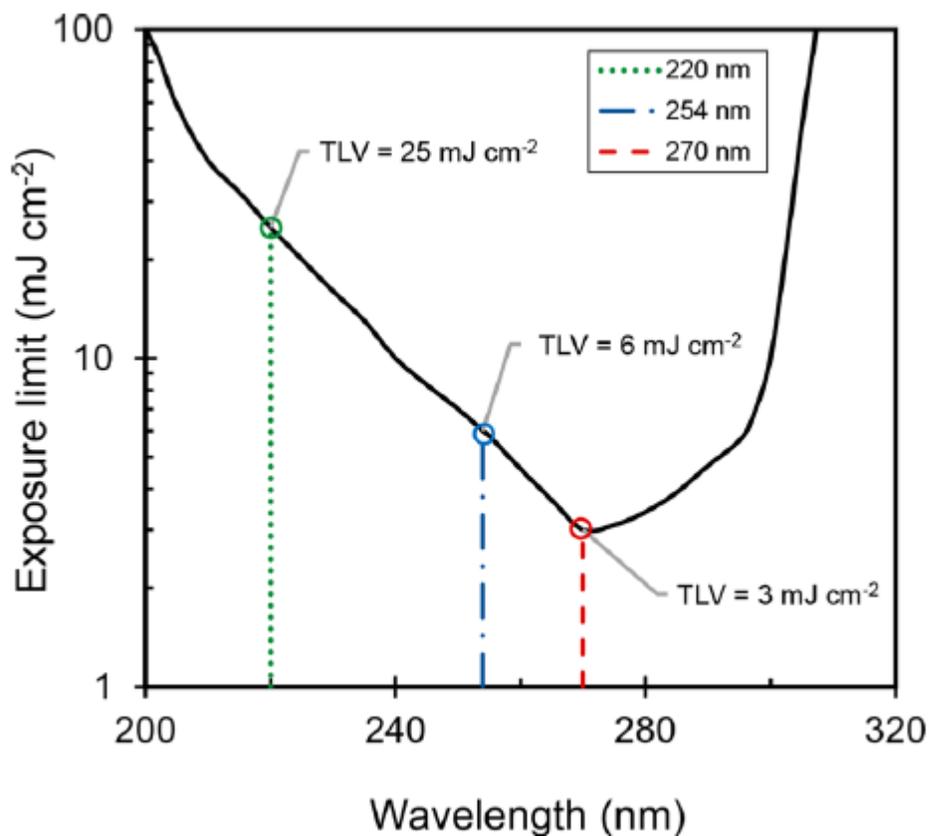


Figure 1.6 : Valeurs limites de seuil (VLS) pour l'exposition humaine aux UV sur le spectre UVC (Raeiszadeh et al., 2020)

Comme la montre la figure, l'efficacité spectrale des rayons UVC à 220 nm est la même que celle de 270 nm, ce qui veut dire le VLS pour l'exposition humaine (Raeiszadeh et al., 2020). De graves réactions semblables à un coup de soleil peuvent se produire si la dose d'UV dépasse la VLS. Dans ce cas, l'utilisation d'un équipement de protection individuelle approprié est requise (lunettes et gants de protection contre les rayons UV). La mise en place de dispositifs de sécurité tels que le verrouillage ou des capteurs de mouvement pourraient réduire considérablement le risque d'exposition (Raeiszadeh et al., 2020).

b) **Risques technologiques**

Les systèmes responsables du fonctionnement des AGV risquent d'être confrontés à des cyberattaques. Une cyberattaque se produit par l'introduction de virus informatiques ou par un piratage de données sensibles (De Las Morenas et al., 2020). L'évènement qui se produit est l'arrêt ou le dysfonctionnement des AGV. Ces derniers mènent à un retardement de production en plus des risques physiques qui peuvent se produire (Chowdhury et al., 2020). Les AGV dépendent aussi de la fiabilité du wifi auquel ils sont connectés. Le système AGV utilise une communication sans fil pour envoyer les informations aux AGV et donner l'ordre. L'arrêt de wifi ou son mauvais fonctionnement mettra alors tous les AGV en arrêt (KMC, 2021). L'arrêt ou le retardement met les travailleurs sous pression, cela mène au stress et à des surcharges physiques et mentales (INRS, 2018; Laberge et al., 2018). Chaque fabricant des AGV utilise son propre système d'AGV. L'achat d'un ou plusieurs AGV, qui utilise un système différent de ceux qui sont déjà installés en entreprise, empêchera leurs fonctionnements. Ce qui sera soit très coûteux, si l'entreprise décide d'acheter le bon système pour ces AGV, soit techniquement impossible de les faire fonctionner. Le risque de cette intégration mènera certainement à des risques psychologiques et physiques (KMC, 2021).

c) **Risques environnementaux**

L'environnement de travail joue aussi un rôle concernant le fonctionnement des AGV. Par exemple, le risque d'accident sera très augmenté si la surface du sol est dégradée, lisse ou glissante. Des surfaces en mauvais état peuvent induire ou augmenter les vibrations ressenties à bord des véhicules. Ces vibrations risquent de créer des problèmes au niveau des connecteurs et des dispositifs électroniques (KMC, 2021). Les AGV peuvent éprouver des difficultés à circuler et peuvent engendrer des risques physiques si le sol n'est pas uniforme et parfaitement plan. Un AGV ne peut pas détecter un obstacle s'ils ne sont pas sur le même niveau comme représente la Figure 1.7. La distance de freinage ne sera donc pas suffisante et des accidents peuvent se produire (Bell et al., 2016).

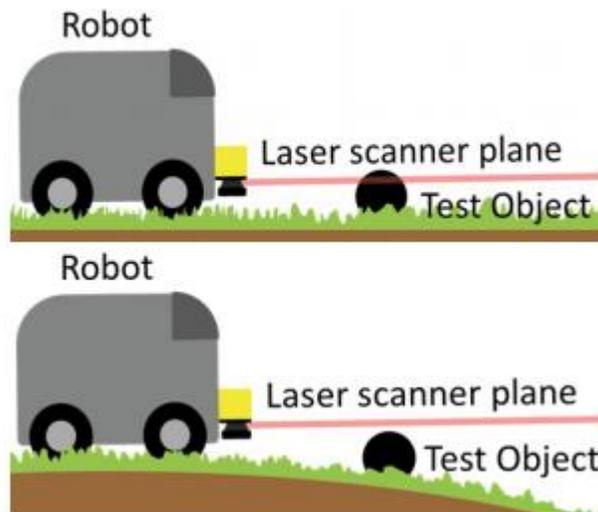


Figure 1.7 : Cas d'un objet situé en pente (Bell et al., 2016)

Le sol doit être isolé des conductivités électriques. Un sol complètement isolé risque de charger l'AGV d'énergies électrostatiques et de le mettre en danger (KMC, 2021). Concernant la vision des AGV, il faut s'assurer de la mesure du flux lumineux efficace pour les caméras ou les lasers. Un AGV risque de mal fonctionner dans un milieu avec une mauvaise vision (KMC, 2021). Les AGV dans les milieux externes sont aussi à prendre en considération. L'atmosphère joue un rôle sur le comportement du véhicule. D'un côté, la vision d'un AGV peut mal fonctionner à cause d'une forte pluie ou d'un mouvement de poussières à cause du vent. D'un autre côté, un vent fort risque d'empêcher le véhicule de circuler librement. Ne pas prendre en considération l'analyse du terrain fera que les risques physiques ou mentaux seront encore plus présents et donc des accidents risqueront d'arriver (Ministère du Travail, 2014; Laberge et al., 2018).

d) **Risques ergonomiques**

L'intégration des AGV dans les entreprises réduira la charge physique des travailleurs. Mais la présence des travailleurs est toujours importante afin de les contrôler (Marková et al., 2019). Les risques ergonomiques peuvent être alors présents (CCHST, 2016; Marková et al., 2019). Concernant la collaboration avec les AGV, les travailleurs peuvent avoir des tâches répétitives.

Les gestes répétitifs ou des postures inhabituelles mèneront à des risques liés à la charge physique de travail (fatigue, inconfort, douleur, etc.), et aux risques de troubles musculosquelettiques (TMS) à long terme (Jocelyn et al., 2017; INRS, 2018). Pour le travail de bureautique, la position assise d'une longue durée influe sur la circulation sanguine. Cela cause une sensation de fatigue et les muscles deviennent vulnérables aux blessures. La mauvaise posture est aussi responsable des lésions professionnelles issues d'un travail en position assise (CCHST, 2016).

e) **Risques mentaux et psychosociaux**

Le stress peut être induit aussi par des risques psychosociaux. En effet, la réduction des tâches lourdes entraîne la peur de perdre son travail (Min et al., 2019). D'un côté, l'isolement du travailleur avec les AGV provoque du stress (CCHST, 2018) et de l'autre côté, le manque de formation pour collaborer avec les AGV est aussi l'un des risques psychosociaux qui mènent au stress. Le travailleur peut alors commettre des erreurs qui lui causeront des dégâts physiques dus à des inattentions ou à la difficulté de concentration. Un travailleur sera surchargé mentalement s'il n'arrive pas à s'adapter à la vitesse de fonctionnement de l'AGV (Jocelyn et al., 2017). Ces sources causent de l'anxiété, des troubles de sommeil, de la fatigue physique et mentale, ainsi que d'autres effets physiologiques chez le travailleur (maux de tête, maux de ventre, etc.) (INRS, 2018; Laberge et al., 2018). Un travailleur risque aussi de développer des maladies comme la dépression, les problèmes cardiaques ou les TMS (INRS, 2018).

La majorité des risques liés aux AGV sont résumés et présentés dans la Figure 2.8.

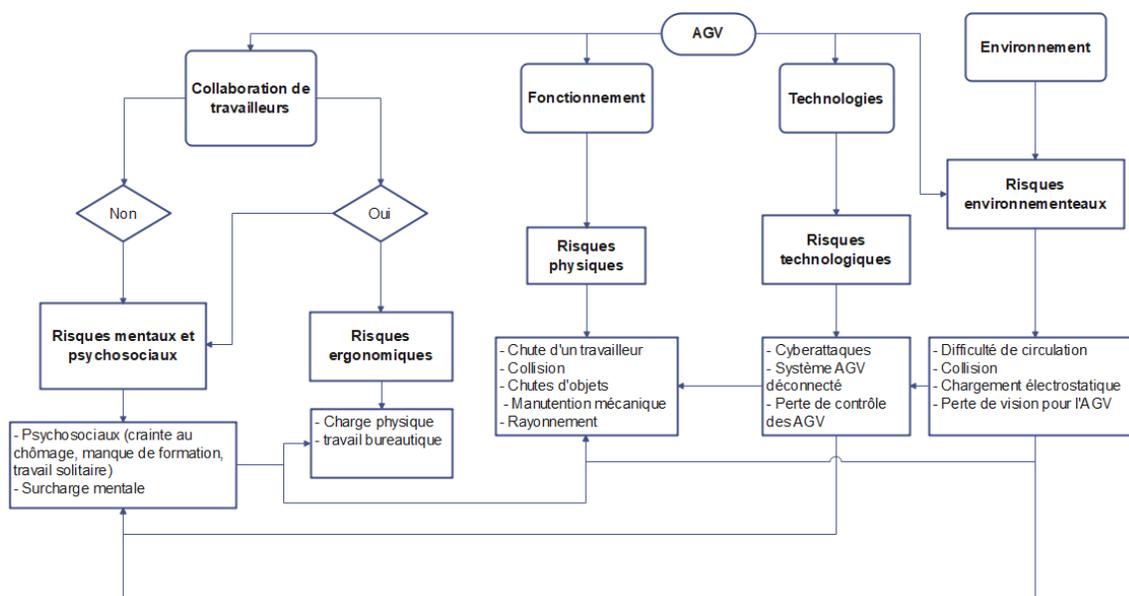


Figure 1.8 : Récapitulatif des liens de causalité des différents risques généraux liés à l'usage des AGV

La Figure 1.8 synthétise l'ensemble des risques associés aux AGV, tels qu'ils sont décrits dans la revue de littérature. Les losanges, en particulier, sont utilisés dans le diagramme pour identifier et mettre en évidence les risques spécifiques qui peuvent survenir lors des interactions entre les travailleurs et les AGV. Plus précisément, ils indiquent les risques liés à la collaboration entre les travailleurs et les AGV, que cette collaboration ait lieu ou non.

Le tableau 2.2 résume les risques liés à l'utilisation des AGV.

Tableau 1.2 : Portrait des dangers liés aux AGV

| Catégories | Dangers | Sources | Évènements | Conséquences | Références |
|----------------|--|---|---|-----------------------------|--|
| Physiques | Chute du travailleur après contact avec un AGV de petites dimensions | Inattentions humaines | Chute du travailleur | Blessures légères ou graves | (KMC, 2021) (Wu et al., 2020) (Hellmann et al., 2019) (Wang et al., 2019) (INRS, 2018) (Laberge et al., 2018) (CNESST, 2017) (Jocelyn et al., 2017) (Ministère du Travail, 2014) (Bouliane et al., 2011) (CSST, 2011) (Chinniah et al., 2008) |
| | | | | Décès | |
| | | Zones aveugles | Chute du travailleur | Blessures légères ou graves | |
| | | | | Décès | |
| | | VAI évitant un obstacle | Chute du travailleur | Blessures légères ou graves | |
| | | | | Décès | |
| | Collision | Inattentions humaines | Heurt du travailleur par l'AGV | Écrasement | |
| | | | | Blessures légères ou graves | |
| | | | | Décès | |
| | | Inattentions humaines | Projection de l'objet vers l'avant de l'AGV | Écrasement | |
| | | | | Blessures légères ou graves | |
| | | | | Décès | |
| | | Renversement | Renversement | Écrasement ou explosion | |
| | | | | Blessures légères ou graves | |
| | | | | Décès | |
| Zones aveugles | Heurt du travailleur par l'AGV | Écrasement | | | |
| | | Blessures légères ou graves | | | |
| | | Décès | | | |
| | Projection de l'objet vers l'avant de l'AGV | Projection de l'objet vers l'avant de l'AGV | Écrasement | | |
| | | | Blessures légères ou graves | | |
| | | | Décès | | |

| Catégories | Dangers | Sources | Évènements | Conséquences | Références |
|---------------------------------------|--|------------------------------------|---|-----------------------------|--|
| Physiques | Collision | Zones aveugles | Renversement | Écrasement ou l'explosion | (KMC, 2021) (Wu et al., 2020) (Hellmann et al., 2019) (Wang et al., 2019) (INRS, 2018) (Laberge et al., 2018) (CNESST, 2017) (Jocelyn et al., 2017) (Ministère du Travail, 2014) (Bouliane et al., 2011) (CSST, 2011) (Chinniah et al., 2008) |
| | | | | Blessures légères ou graves | |
| | | | | Décès | |
| | | Défaut de conception | Heurt du travailleur par l'AGV | Écrasement | |
| | | | | Blessures légères ou graves | |
| | | | | Décès | |
| | | | Projection de l'objet vers l'avant de l'AGV | Écrasement | |
| | | | | Blessures légères ou graves | |
| | | | | Décès | |
| | | Chutes d'objets | Écrasement ou l'explosion | | |
| | | | Blessures légères ou graves | | |
| | | | Décès | | |
| | VAI évitant un obstacle (autonomie) | Heurt du travailleur par le VAI | Écrasement | | |
| | | | Blessures légères ou graves | | |
| | | | Décès | | |
| Collision entre deux ou plusieurs VAI | | Écrasement ou l'explosion | | | |
| | | Blessures légères ou graves | | | |
| | | Décès | | | |
| Chute d'objets | Objet ou produit mal placé dans le rayonnage | Renversement d'un plusieurs objets | Dégâts dus à des explosions (brûlures, plaies, fractures, etc.) | | |

| Catégories | Dangers | Sources | Évènements | Conséquences | Références |
|------------|----------------|--|---|---|--|
| Physiques | Chute d'objets | Objet ou produit mal placé dans le rayonnage | Renversement d'un plusieurs objets | Blessures légères ou graves | (KMC, 2021) (Wu et al., 2020) (Hellmann et al., 2019) (Wang et al., 2019) (INRS, 2018) (Laberge et al., 2018) (CNESST, 2017) (Jocelyn et al., 2017) (Ministère du Travail, 2014) (Bouliane et al., 2011) (CSST, 2011) (Chinniah et al., 2008) |
| | | | | Écrasement | |
| | | | | Décès | |
| | | | Effondrement de l'étagère | Blessures légères ou graves | |
| | | | | Écrasement | |
| | | | | Décès | |
| | | Mauvaise fixation de l'objet ou du produit sur l'AGV | Chute de l'objet | Dégâts dus à des explosions (brûlures, plaies, fractures, etc.) | |
| | | | | Blessures légères ou graves | |
| | | | | Écrasement | |
| | | | | Décès | |
| | | Arrêt brusque d'un AGV portant le produit | Projection de l'objet vers l'avant de l'AGV | Dégâts due à des explosions (brûlures, plaies, fractures, etc.) | |
| | | | | Blessures légères ou graves | |
| Écrasement | | | | | |

| Catégories | Dangers | Sources | Évènements | Conséquences | Références |
|------------|---------------------------------|--|---|---|---|
| Physiques | Chutes d'objets | Arrêt brusque d'un AGV portant le produit | Projection de l'objet vers l'avant de l'AGV | Décès | (KMC, 2021) (Wu et al., 2020) (Wang et al., 2019) (INRS, 2018) (Laberge et al., 2018) (CNESST, 2017) (Jocelyn et al., 2017) (Ministère du Travail, 2014) (Bouliane et al., 2011) (CSST, 2011) (Chinniah et al., 2008) |
| | | Collision de l'AGV avec un travailleur | Projection de l'objet vers l'avant de l'AGV | Dégâts due à des explosions (brûlures, plaies, fractures, etc.) | |
| | | | | Blessures légères ou graves | |
| | | | | Écrasement | |
| | | Collision entre deux ou plusieurs AGV | Projection ou chute de l'objet | Dégâts dus à des explosions (brûlures, plaies, fractures, etc.) | |
| | | | | Blessures légères ou graves | |
| | Écrasement | | | | |
| | Liés à la manutention mécanique | Un travailleur se trouve entre deux chariots liés à un AGV de remorquage en mouvements | Écrasement | Blessures légères ou graves | |
| | | | | Décès | |
| | | Incapacité de détecter la présence du travailleur par l'AGV derrière ou entre les chariots | Basculement de la charge | Blessures légères ou graves | |
| | | | | Décès | |
| | | Incapacité de détecter la présence du travailleur par l'AGV derrière ou entre les chariots | Basculement de la charge | Blessures légères ou graves | |
| Décès | | | | | |

| Catégories | Dangers | Sources | Évènements | Conséquences | Références |
|-----------------------|--|--|--------------------------|--|--|
| Physiques | Liés à la manutention mécanique | Un VAI de remorquage évitant un obstacle | Écrasement | Blessures légères ou graves | (KMC, 2021) |
| | | | | Décès | (Wu et al., 2020) |
| | | | Collision | Blessures légères ou graves | (Wang et al., 2019) |
| | | | | Décès | (INRS, 2018) |
| | | | Basculement de la charge | Blessures légères ou graves | (Laberge et al., 2018) |
| | | | | Décès | (CNESST, 2017) |
| Écrasement | (Jocelyn et al., 2017) (Ministère du Travail, 2014) (Bouliane et al., 2011) (CSST, 2011) (Chinniah et al., 2008) | | | | |
| Liés aux rayonnements | Se trouver au même milieu qu'un VAI de désinfection UV lors de son utilisation | Exposition aux UV-C | Brûlures | (Raeiszadeh et al., 2020) (CCHST, 2016) | |
| | | | Cancer | | |
| | | | Mutations génétiques | | |
| Technologiques | Cyberattaques | Introduction de virus informatique | Arrêt de l'AGV | Stress dû à la sous-pression | (KMC, 2021) |
| | | | | Surcharge physique et mentale | (INRS, 2018; Laberge et al., 2018; Chowdhury et al., 2020; De Las Morenas et al., 2020; KMC, 2021) |

| Catégories | Dangers | Sources | Évènements | Conséquences | Références |
|---------------------------|--|---|-------------------------------|-------------------------------|--|
| Technologiques | Cyberattaques | Introduction de virus informatique | Perte de contrôle de l'AGV | Stress dû à la sous-pression | (KMC, 2021) (Chowdhury et al., 2020) (De Las Morenas et al., 2020) (INRS, 2018) (Laberge et al., 2018) |
| | | | | Surcharge physique et mentale | |
| | | | | Dégâts physiques | |
| | | | | Décès | |
| | Piratage de données sensibles | Perte de contrôle de l'AGV | Stress dû à la sous-pression | | |
| | | | Surcharge physique et mentale | | |
| | | | Dégâts physiques | | |
| | | | Décès | | |
| | Système AGV déconnecté | Arrêt ou mauvais fonctionnement de wifi | Arrêt des AGV | Stress dû à la sous-pression | |
| | | | | Surcharge physique et mentale | |
| Perte de contrôle des AGV | Intégration d'un ou de plusieurs AGV soumis à un système AGV différent de celui de l'entreprise. | Conflit entre AGV | Stress dû à la sous-pression | | |
| | | | Surcharge physique et mentale | | |
| | | | Dégâts physiques | | |
| | | Arrêt des AGV | Stress dû à la sous-pression | | |

| Catégories | Dangers | Sources | Évènements | Conséquences | Références |
|-------------------------|----------------------------------|--|---------------|-------------------------------|--|
| Technologiques | Perte de contrôle des AGV | Intégration d'un ou de plusieurs AGV soumis à un système AGV différent de celui de l'entreprise. | Arrêt des AGV | Surcharge physique et mentale | (KMC, 2021) (Chowdhury et al., 2020) (De Las Morenas et al., 2020) (INRS, 2018) (Laberge et al., 2018) |
| Environnementaux | Difficulté de circulation | Surfaces lisses ou glissantes | Collision | Écrasement | (KMC, 2021) (INRS, 2018) (Laberge et al., 2018) (Bell et al., 2016) (Ministère du Travail, 2014) |
| | | | | Blessures légères ou graves | |
| | | | | Décès | |
| | | Surfaces dégradées | Collision | Écrasement | |
| | | | | Blessures légères ou graves | |
| | | | | Décès | |
| | | Vent fort pour les AGV externes | Renversement | Écrasement ou l'explosion | |
| | | | | Blessures légères ou graves | |
| | | | | Décès | |

| Catégories | Dangers | Sources | Évènements | Conséquences | Références |
|-------------------------------|-------------------------------------|---|---|-------------------------------|--|
| Environnementaux | Difficulté de circulation | Vibrations au niveau des connecteurs et dispositifs électroniques | Arrêt d'un ou plusieurs AGV | Stress dû à la sous-pression | (KMC, 2021) (INRS, 2018) (Laberge et al., 2018) (Bell et al., 2016) (Ministère du Travail, 2014) |
| | | | | Surcharge physique et mentale | |
| | | | Perte de contrôle d'un ou plusieurs AGV | Stress due à la sous-pression | |
| | | | | Surcharge physique et mentale | |
| | Dégâts physiques | | | | |
| | Collision de l'AGV avec un obstacle | Obstacle se trouve en un niveau de surface plus bas | Renversement | Décès | |
| | | | | Écrasement ou l'explosion | |
| | | | | Blessures légères ou graves | |
| | Chargement électrostatique | Sol isolé | Dysfonctionnement de l'AGV | Décès | |
| | | | | Stress dû à la sous-pression | |
| Surcharge physique et mentale | | | | | |
| Dégâts physiques | | | | | |
| Arrêt de l'AGV | | | Stress dû à la sous-pression | | |

| Catégories | Dangers | Sources | Évènements | Conséquences | Références |
|------------------|--------------------------------------|--|---|-------------------------------|--|
| Environnementaux | Chargement électrostatique | Sol isolé | Arrêt de l'AGV | Surcharge physique et mentale | (KMC, 2021) (INRS, 2018) (Laberge et al., 2018) (Bell et al., 2016) (Ministère du Travail, 2014) |
| | Perte de vision pour les AGV | Flux lumineux insuffisant | Mauvais fonctionnement des AGV | Stress dû à la sous-pression | |
| | | | | Surcharge physique et mentale | |
| | | | | Dégâts physiques | |
| | | | | Décès | |
| | | Présence d'une forte pluie ou mouvement de poussière | Mauvais fonctionnement des AGV | Stress dû à la sous-pression | |
| | | | | Surcharge physique et mentale | |
| Dégâts physiques | | | | | |
| Décès | | | | | |
| Ergonomiques | Liés à la charge physique de travail | Mouvements répétitifs | Déplacement des colis de façon répétitifs | TMS | (Marková et al., 2019) (INRS, 2018) (Jocelyn et al., 2017) (CCHST, 2016) |
| | | | | Inconfort | |
| | | | | Douleur | |
| | | | | Fatigue | |
| | | | Mouvement avec des postures ou des gestes inhabituels | TMS | |
| | | | | Fatigue | |
| | | | | Douleurs | |

| Catégories | Dangers | Sources | Évènements | Conséquences | Références |
|--------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---|---|---|
| Ergonomiques | Liés à la charge physique de travail | Mouvements répétitifs | Mouvement avec des postures ou des gestes inhabituels | Inconfort | (Marková et al., 2019) (INRS, 2018) (Jocelyn et al., 2017) (CCHST, 2016) |
| | Liés au travail bureautique | Position assise d'une longue durée | Influence sur la circulation sanguine | Fatigue | |
| | | | Avoir une mauvaise posture | Muscles plus vulnérables aux blessures | |
| | | | | Fatigue | |
| | | | | Douleurs | |
| | | | | Inconfort | |
| Psychosociaux et mentaux | Psychosociaux | Peur de perdre le travail | Stress | Anxiété | (Min et al., 2019) (CCHST, 2018) (INRS, 2018) (Laberge et al., 2018) (Jocelyn et al., 2017) |
| | | | | Troubles de sommeil | |
| | | | | Fatigue physique et mentale | |
| | | | | Effets physiologiques | |
| | | | | Maladies dues au cumul (dépression, TMS, problèmes cardiaques...) | |
| | | | | Déconcentration du travailleur lors de la réalisation de sa tâche | |
| | | Manque d'attention | Dégâts physiques | | |
| Manque de formation | Stress | Anxiété | | | |

| Catégories | Dangers | Sources | Évènements | Conséquences | Références |
|--------------------------|---|----------------------------|---|---|---|
| Psychosociaux et mentaux | Psychosociaux | Manque de formation | Stress | Troubles de sommeil | (Min et al., 2019) (CCHST, 2018) (INRS, 2018) (Laberge et al., 2018) (Jocelyn et al., 2017) |
| | | | | Fatigue physique et mentale | |
| | | | | Effets physiologiques | |
| | | | | Maladies dues au cumul (dépression, TMS, problèmes cardiaques...) | |
| | | Collaboration avec les AGV | Le travailleur est plus concentré sur l'anticipation et la synchronisation de l'AGV | Surcharge mentale | |
| | | | | Dégâts physiques | |
| | | | Retardement sur la production | Surcharge mentale | |
| | | | Stress | Anxiété | |
| | | | | Troubles de sommeil | |
| | | | | Fatigue physique et mentale | |
| | | | | Effets physiologiques | |
| Sentiments de solitude | Maladies dues au cumul (dépression, TMS, problèmes cardiaques...) | Anxiété | | | |
| | | Troubles de sommeil | | | |

| Catégories | Dangers | Sources | Évènements | Conséquences | Références | | |
|---------------------------------|--------------------------|--|------------------------|---|---|---|------------------|
| Psychosociaux et mentaux | Psychosociaux | Collaboration avec les AGV | Sentiments de solitude | Anxiété | (Min et al., 2019) (CCHST, 2018) (INRS, 2018) (Laberge et al., 2018) (Jocelyn et al., 2017) | | |
| | | | | Troubles de sommeil | | | |
| | | | | Maladies dues au cumul (dépression, TMS, problèmes cardiaques...) | | | |
| | | Travail solitaire et isolement | Stress | Anxiété | | | |
| | | | | Troubles de sommeil | | | |
| | | | | Fatigue physique et mentale | | | |
| | Surcharge mentale | Difficulté de collaboration avec les AGV | | | | Effets physiologiques | |
| | | | | | | Maladies dues au cumul (dépression, TMS, problèmes cardiaques...) | |
| | | | | | | Manque d'attention | Dégâts physiques |
| | | | | | | Difficulté de concentration | Dégâts physiques |
| | | | | Commettre des erreurs | Dégâts physiques | | |
| | | | | Retardement dans la production | Surcharge mentale | | |

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Le but principal de ce chapitre est de présenter la problématique et les objectifs de recherche. Ce chapitre comporte trois parties. La première partie (2.1) détaille les éléments principaux du problème général traité. Puis, La deuxième partie (2.2) identifie les questions de recherche. Et finalement, la troisième partie (2.3) est consacrée à la formulation des différents objectifs de recherche.

2.1 Problématique de recherche

2.1.1 Identification des éléments du problème

La problématique peut être résumée en trois éléments essentiels : la complexité de la technologie, le manque de cadre législatif/réglementaire et la complexité/diversité des dangers liés aux AGV. Ces éléments de problèmes sont appuyés principalement par la revue de la littérature.

a) Complexité de la technologie

L'intégration de la technologie est devenue plus complexe dans l'Industrie 4.0. Les différentes technologies coopèrent dans tous les services de l'entreprise (Lasi et al., 2014). En ce qui concerne les AGV, l'intégration de ces derniers relève plusieurs préoccupations. D'abord, l'entreprise devra s'assurer d'avoir un nombre suffisant d'AGV, de prendre en considération le type de marchandises à manipuler et la quantité à déplacer (Correia et al., 2020). Ensuite, choisir une méthode de navigation de ces véhicules et analyser une variété d'entrées dépendent de l'enchaînement des tâches au sein de l'entreprise (Bocewicz et al., 2014; Uttendorf et al., 2016). Mehami et al. (2018) ont mentionné que la planification des trajets selon le nombre des AGV peut être coûteuse et devra être transférée à un puissant processus central. Enfin, le système des AGV doit être capable de concevoir en sécurité le trajet des véhicules, gérer les batteries, indiquer le positionnement des AGV au ralenti et résoudre les blocages (Correia et al., 2020).

b) Manque de cadre législatif et réglementaire

Bien que l'utilisation des AGV soit devenue de plus en plus populaire, il y en a encore un manque au niveau du cadre législatif et réglementaire. Les AGV s'occupent des travaux laborieux afin d'éliminer des dangers physiques et ergonomiques, entre autres. Cependant, d'autres dangers font leur apparition, comme présenté dans le portrait des dangers (Tableau 1.2) (KMC, 2021). Bon nombre d'études se focalisent principalement sur les risques de collision liés aux AGV, en concentrant leur attention sur la phase de conception des véhicules. Par conséquent, l'évaluation des risques lors des étapes ultérieures, telles que l'intégration et l'utilisation des AGV, est souvent négligée ou insuffisamment approfondie (Digmayr et al., 2019). La norme ISO 3691-4 (2023b), qui montre les exigences de sécurité et de vérification, ne prend en considération que les chariots de manutention, tandis qu'il existe plusieurs types d'AGV. En effet, l'usage de chaque type de véhicule contient un ou plusieurs dangers selon le type du véhicule (KMC, 2021).

c) Complexité et diversité des dangers liés aux AGV

Les dangers liés aux AGV sont très diversifiés et peuvent être interdépendants, notamment les dangers physiques et psychologiques qui peuvent dépendre d'un ou de plusieurs autres types de dangers. On remarque dans la section 1.3.6 de la revue de la littérature que les dangers peuvent apparaître à cause d'une mauvaise conception des AGV, lors de leur intégration et/ou lors de l'utilisation de ces véhicules. Les risques peuvent être alors prévenus lors de la conception, mais peuvent apparaître ou être source d'un ou de plusieurs autres dangers dans la phase d'intégration ou d'utilisation des AGV (KMC, 2021). Pour prendre en considération un danger, il est nécessaire d'étudier en fonction des phases qui sont la conception, l'intégration et l'utilisation des AGV, et voir s'il existe des liens avec d'autres dangers. Par conséquent, l'évaluation des risques en lien avec les AGV, qu'on étudie dans les articles scientifiques, n'est pas en fonction des liens entre les dangers ni en fonction des phases d'un AGV qu'on a mentionné. La Figure 2.1 résume la problématique de recherche avec ses trois principaux éléments.

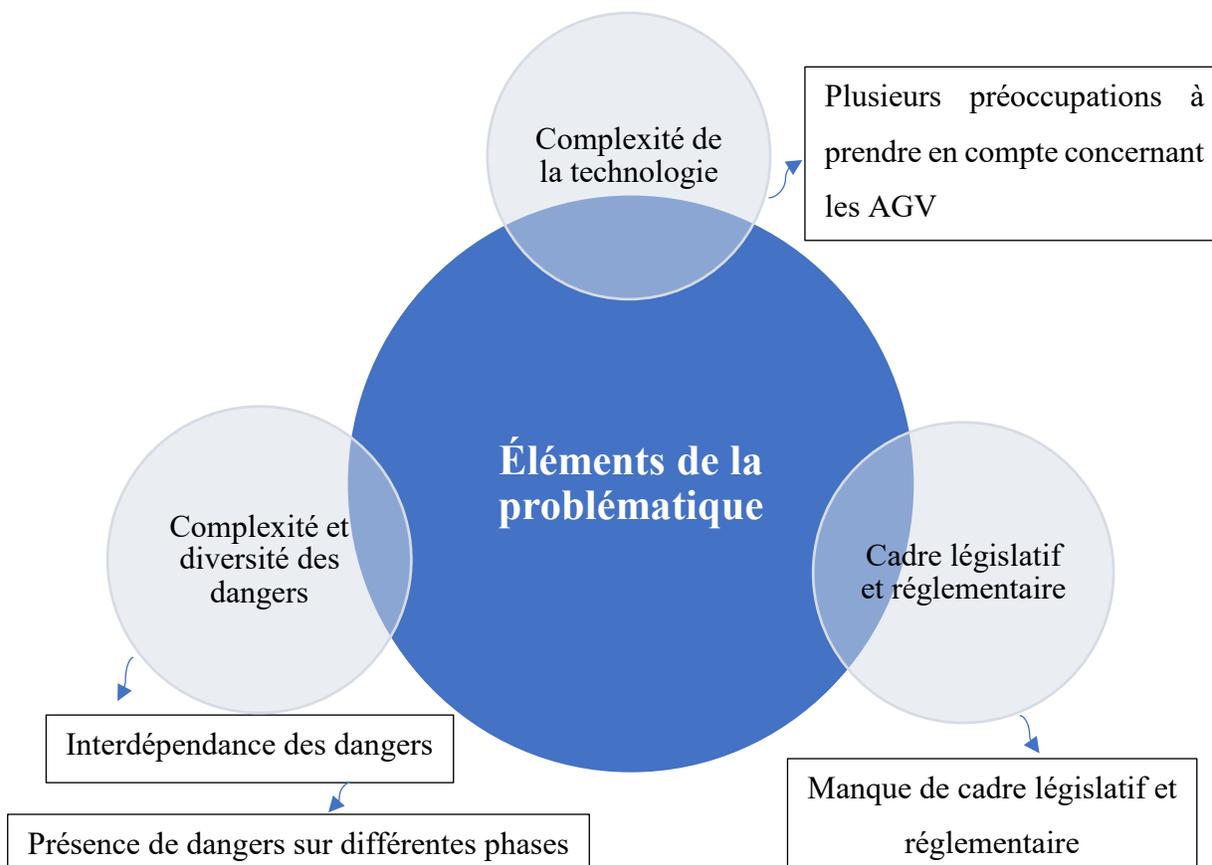


Figure 2.1 : Principaux éléments de la problématique de recherche

2.2 Questions de recherche

Les différents dangers qui sont déterminés dans le portrait du Tableau 1.2 ont une probabilité de se produire. Il reste problématique de mettre en place un système fournissant des solutions pour prévenir ces dangers, ce qui mène à formuler les questions suivantes :

- Quels sont les dangers liés aux VAI qui ont plus de risque d'apparaître?
- Comment gérer les dangers existants et émergents à partir de la conception d'un VAI jusqu'à son utilisation?

2.3 Objectifs de la recherche

L'objectif principal de ce projet est d'élaborer un portrait de solution de prévention des dangers en lien avec les VAI. Pour faire suite aux questions de recherche, les objectifs secondaires sont alors :

- Identifier les dangers possibles que représentent les VAI aux étapes de la conception, de l'intégration et de l'utilisation;
- Analyser le comportement d'un VAI dans différentes situations;
- Proposer les solutions de prévention des dangers que représentent les VAI en fonction de chaque phase (conception, intégration et utilisation).

MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Le but principal de ce chapitre est de présenter la méthodologie de recherche mise en œuvre. Ce chapitre comporte sept sections principales. La première section (3.1) montre la démarche méthodologique adoptée à cette recherche. Les cinq autres sections (3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6) détaillent chacune des étapes de la méthodologie de recherche.

3.1 Démarche méthodologique de la recherche

La démarche méthodologique comporte un cadre théorique et un cadre pratique. Premièrement, le cadre théorique est dédié à l'identification théorique des dangers en lien avec les AGV. Ce cadre est basé principalement sur une recherche bibliographique. Deuxièmement, le cadre pratique se compose de quatre étapes :

1. Analyse du comportement d'un VAI dans différentes situations;
2. Développement d'un outil pour les experts en SST qui s'intéressent aux VAI;
3. Identification des solutions de prévention en lien avec la conception, l'intégration et l'utilisation des VAI;
4. Élaboration d'un outil de prévention relié en lien avec les VAI.

La Figure 3.1 résume la démarche méthodologique adoptée.

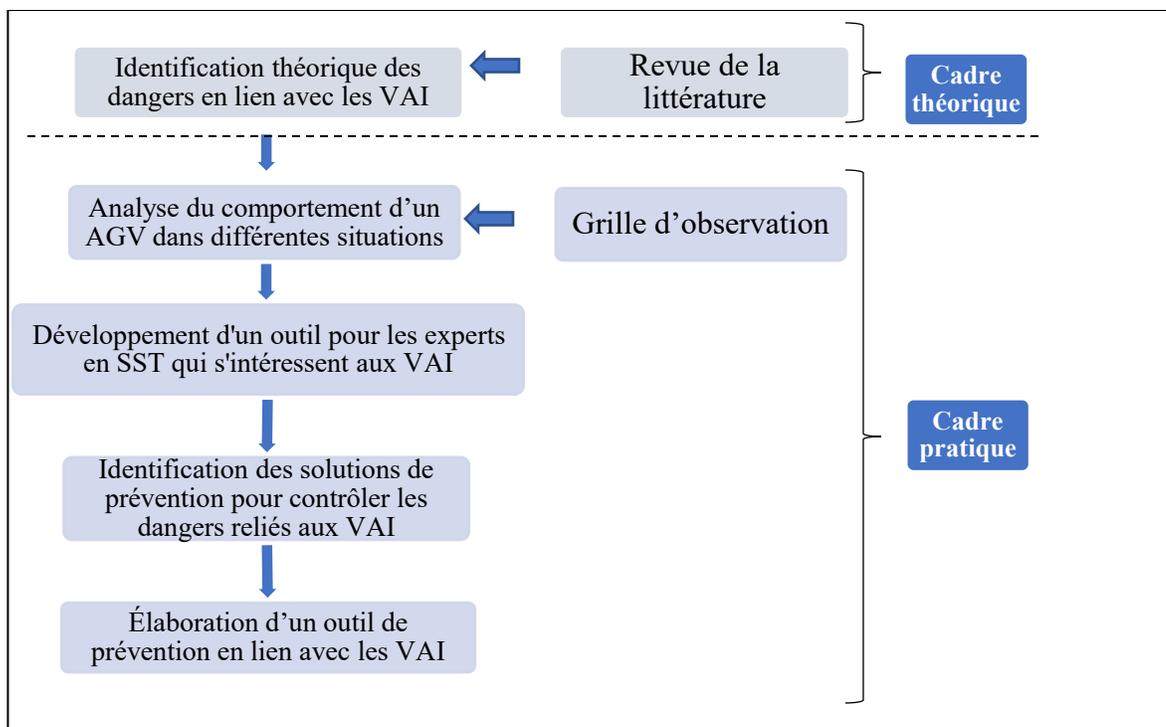


Figure 3.1 : Démarche méthodologique de la recherche

3.2 Identification théorique des dangers en lien avec les AGV

Un portrait de dangers, qui peuvent être liés aux AGV, est réalisé à partir de la revue de littérature (chapitre 1, 1.3.6). Ces dangers sont représentés par la suite dans le Tableau 3 qui les regroupe en catégories de danger. La base de données *Scopus*, le site web de la CNESST et celui de l'IRSST ont été utilisés pour la recherche bibliographique. Ceci en plus des moteurs de recherche *Google* et *Google Scholar* qu'ont été utilisés pour cette recherche.

Des mots clés ont été utilisés en français et en anglais, dont : « SST », « OHS », « Gestion des risques SST », « OHS management », « autonomous intelligent vehicle », « Automated guided vehicles », « OHS 4.0 », « warehouse 4.0 », « AGV system », « AGV safety », « AIV technologies », « AGV technologies », « autonomous intelligent vehicle risks », « automated guided vehicle risks » et « gestion des risques ».

Les articles publiés dans les revues scientifiques, les articles de conférences, les thèses, les mémoires, les rapports de recherches, les normes, les règlements et les documents législatifs sont les documents trouvés et inclus dans la recherche bibliographique. Des documents aussi produits par des entreprises de fabrication des AGV ont été utilisés vu qu'ils contenaient des éléments importants concernant la gestion des dangers liés aux AGV. En suivant cette démarche, plusieurs dangers ont été identifiés. Certains dangers ont été trouvés en se basant sur des articles qui étudient le comportement des AGV.

La Figure 3.2 résume les étapes de l'identification des dangers liés aux AGV.

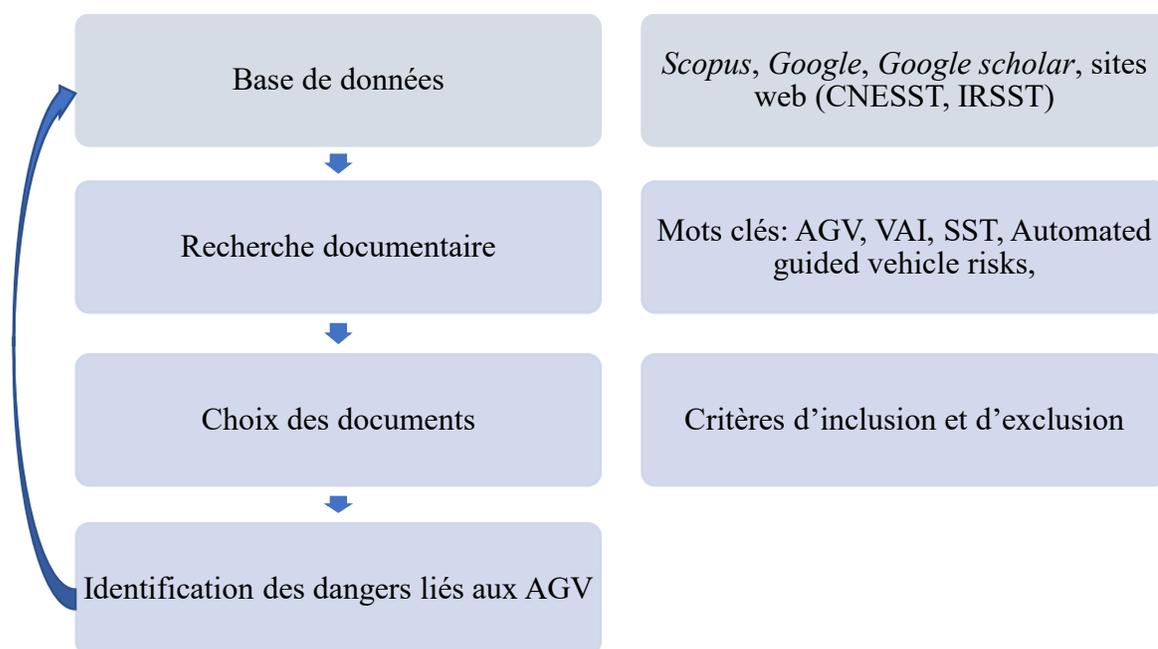


Figure 3.2 : Identification des dangers liés aux AGV

3.3 Analyse du comportement d'un AGV dans différentes situations

Une étude de cas sera réalisée sur un AGV spécifique, qui, au cours de la recherche, a évolué pour devenir un VAI en cours de tests en laboratoire. Le but est de vérifier si des dangers identifiés sont pris en considération. Cette démarche est basée sur le portrait théorique des dangers et permettra de déterminer les dangers qui peuvent surgir en lien avec l'AGV et les différentes sources qu'il faut prendre en considération afin de les gérer. La prévention des dangers peuvent être négligés dépendamment des coûts de prévention,

des probabilités d'apparition et des limites du terrain. La prévention des risques négligés peut se faire à travers la sensibilisation des travailleurs ou à l'aide des affiches de signalisations pour avertir les travailleurs du danger. On a donc analysé la façon dont l'AGV se comporte selon différentes situations au moyen de la simulation. Si des dangers apparaissent, on prendra note des différentes sources possibles en lien avec ces dangers.

- **Caractéristiques de l'AGV**

Le véhicule sur lequel on a travaillé est un VAI qui était auparavant un AGV. Les caractéristiques de ce véhicule sont représentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Caractéristiques du VAI

| Spécification | Valeurs |
|--|-------------------------------------|
| Châssis | |
| Masse | 90 Kg |
| Dimensions (Longueur x Largeur x Hauteur) | 168 x 76 x 23 cm |
| LIDAR (Light Detection and Ranging) | |
| Erreur statistique | ±10mm |
| Résolution angulaire | 0,25 degré |
| Résolution maximale | 20 m |
| Champ de vision | 270 degrés |
| Fréquence de balayage | 20 Hz |
| Moteurs | |
| Type de régulateur | PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) |
| Vitesse linéaire maximale | 1,5 m/s |
| Vitesse angulaire maximale | 0,5 rad/s |

Les moteurs du VAI sont contrôlés par un régulateur de type PID, qui permet d'atteindre une vitesse linéaire maximale de 1,5 m/s et une vitesse angulaire de 0,5 rad/s. La conception de ce véhicule lui confère une agilité et une adaptabilité nécessaires pour naviguer dans des espaces restreints.

De plus, le système de détection d'obstacles LIDAR joue un rôle essentiel dans la sécurité du VAI. Il offre une couverture de champ de vision de 270 degrés et une fréquence de balayage de 20 Hz. Cette technologie permet au véhicule de détecter son environnement en temps réel, contribuant ainsi à la prévention des collisions et à la navigation autonome. Ce VAI respecte des normes comme la norme ANSI R15.08-1 (norme nord-américaine sur les VAI) (2020) et la norme UL 3100 (norme canadienne-américaine sur les VAI) (2018). Ces normes permettent de prendre en considération les dangers tels que les collisions et obligent à mettre en place une sécurité électrique pour le VAI.

- **Scénarios de simulation**

Pour étudier le comportement d'un VAI, 6 scénarios de simulations ont été proposées. L'analyse de la sécurité du VAI s'est principalement concentrée sur les aspects suivants : les collisions, les chutes d'objets, les pannes d'alimentation et les problèmes de connectivité. Pour les collisions, trois scénarios ont été mis en pratique. Le premier scénario concerne la détection d'un obstacle qui se trouve sur le chemin. Le deuxième scénario se concentre sur la capacité du VAI à détecter un obstacle se trouvant dans une zone aveugle. Le troisième scénario est pour voir la réaction du VAI lorsqu'un piéton se trouve sur le chemin du véhicule sans faire attention. En ce qui concerne les chutes d'objets, le scénario proposé permet d'évaluer la capacité du VAI à transporter un objet non fixé. Pour les pannes d'alimentation, l'objectif est de voir la réaction du VAI après une coupure électrique. Enfin, le scénario qui concerne les problèmes de connectivité a pour but de vérifier la réaction du VAI après s'être déconnecté de son système de contrôle.

3.4 Développement d'un outil de collecte de données pour les experts en SST qui s'intéressent aux VAI

Puisque que le projet de recherche se concentre plutôt sur les VAI et que les dangers en lien avec les AGV et les VAI sont les mêmes, le terme AGV sera remplacé par VAI pour le reste des démarches afin de tout généraliser.

Une partie importante de dangers ne peut pas être identifiée et vérifiée lors de l'étude de cas. Un outil sera développé pour les experts en SST qui s'intéressent aux VAI. L'objectif

principal de cet outil est d'identifier sur le terrain les dangers liés aux VAI dans l'environnement de travail. Cela permettra d'obtenir des données quantitatives sur les dangers les plus courants et de les classer en fonction de leur gravité. Si de nouveaux dangers sont identifiés, ils pourront être ajoutés dans le portrait des dangers liés aux VAI. Cette démarche permet également d'identifier de nouveaux dangers émergents en lien avec les VAI. Cet outil est composé de sept sections : Les données personnelles de l'expert en SST, les données de l'entreprise, le cadre législatif et réglementaire, la prise en charge de la SST, les données sur les VAI, les dangers en lien avec les VAI et l'état de santé des travailleurs.

Cette section contribuera également à l'identification de solutions de prévention des dangers en lien avec les VAI dans le futur. Il est important que les mesures préventives adoptées soient en conformité avec les réglementations et normes en vigueur aux échelons local, national et international, ainsi qu'avec les standards spécifiques de l'industrie concernée.

3.5 Identification des solutions de prévention pour contrôler les dangers reliés aux VAI

Pour l'identification des solutions de prévention des dangers liés aux VAI, cette étape touche les trois phases suivantes : la conception, l'intégration et l'utilisation des VAI. Le but est de réaliser un portrait de prévention de ces dangers. Ce portrait contiendra la plupart des dangers qui peuvent être en lien avec les VAI à partir de la conception. Par la suite, des solutions de prévention seront proposées pour chaque phase en fonction de chaque source de danger. Cela permettra de s'assurer, dès la conception d'un VAI, que chaque danger est pris en considération jusqu'à son utilisation. Ce portrait de prévention des dangers liés aux VAI pourra être constamment amélioré si d'autres dangers apparaissent en cours de route ou si l'on trouve de nouvelles solutions plus développées que celles proposées.

Les solutions de prévention des dangers, liés aux VAI choisis, se basent sur diverses sources. Ces sources sont les normes de sécurité, les lois applicables sur la SST, les directives de sécurité industrielles et les principes généraux de sécurité industrielle et de

gestion de la sécurité au travail. L'identification des solutions de prévention est principalement basée sur une recherche théorique approfondie. Les solutions sont sélectionnées en tenant compte de leur pertinence par rapport aux différents dangers en lien avec les VAI et de leur conformité aux normes de sécurité existantes. Cette approche permet de sélectionner un ensemble de solutions de prévention qui sont adaptées aux dangers liés aux VAI. Les solutions sont présentées sous différentes parties : utilisation de système de détection, interface et communication entre les travailleurs et les VAI, signalisation et contrôle des zones de travail dangereuses, formation et sensibilisation, communication et surveillance, gestion de la sécurité et du contrôle des VAI, tests de sécurité pour la prévention des risques liés aux VAI, vérification des fixations d'objets, contrôle des rayonnages pour les VAI, conceptions innovantes pour la prévention des risques liés aux VAI, sécurité informatique, règles d'utilisation et de circulation, stratégie de maintenance pour la sécurité des VAI et prévention des risques psychosociaux/mentaux liés aux VAI.

3.6 Élaboration d'un portrait de solution de prévention des dangers en lien avec les VAI

Le but de cette démarche est de rassembler tous les dangers identifiés en lien avec les VAI. Ensuite, les solutions de prévention identifiées dans la démarche précédente seront affectées pour chaque danger en fonction de chaque source. Ces solutions seront réparties ensuite sur chaque phase qui leur convient. Ces phases sont : la conception, l'intégration et l'utilisation des VAI. Cette démarche de prévention sera présentée sous forme d'un portrait de solutions de prévention.

Le portrait a la forme d'un tableau et sa structure sera définie de manière à offrir une vue claire et organisée des dangers et des solutions de préventions liées aux VAI. Chaque colonne apportera des informations spécifiques à la compréhension de la démarche de prévention.

La première partie du tableau contient les catégories des dangers. Les dangers sont regroupés en catégories spécifiques. Cela permet de classer et d'organiser les dangers

associés aux VAI en fonction de leurs caractéristiques essentielles. La classification simplifie l'identification des types de dangers auxquels les VAI peuvent être exposés.

La deuxième colonne répertorie les dangers relevant de chaque catégorie. La troisième colonne identifie les sources potentielles de chaque danger. Elle clarifie les facteurs ou les situations qui peuvent contribuer à l'apparition des dangers liés aux VAI. Cela est essentiel pour une prévention efficace. La quatrième colonne contient les solutions de préventions. Ces solutions sont regroupées en trois parties correspondant aux phases critiques : conception, intégration et utilisation des VAI. Cette organisation facilite l'application des mesures au moment opportun. Enfin, la cinquième colonne contient les références pour chaque solution. La majorité de ces références viennent de différentes normes. Il reste à noter que les références citées pour chaque solution de prévention ne traitent pas forcément des VAI. Ces références ont été sélectionnées en raison de leur pertinence étendue et de leur applicabilité à diverses questions de sécurité associées aux VAI, touchant ainsi les travailleurs dans une variété de contextes. À titre d'exemple, des normes ergonomiques ou de sécurité industrielle peuvent fournir des directives précieuses pour la conception d'interface personne-machine, même si elles ne mentionnent pas forcément les VAI en particulier. Ces références assurent que chaque mesure préventive est en accord avec les normes de sécurité établies, fournissant ainsi une stratégie de prévention des dangers qui est fondée sur des critères stricts et qui peut être validée à travers des méthodes de vérification éprouvées.

Une approche systématique est adoptée dans le but d'intégrer les différentes solutions de prévention des dangers liés aux VAI dans chaque phase (conception, intégration et utilisation). Cette démarche s'appuie sur des critères basés sur des normes internationales, des lois et des principes généraux de sécurité industrielle et de gestion de la sécurité au travail. D'abord, pour la phase de conception, l'objectif principal est de prévenir les dangers liés aux VAI dès le début du développement d'un VAI. Donc, les solutions de prévention qui concerne la conception du véhicule, ont été sélectionnées pour la phase de conception. Ces solutions sont basées sur des normes spécifiques ainsi que sur des principes ergonomiques et de sécurité. Ensuite, en ce qui concerne la phase d'intégration des VAI, les solutions de prévention sont choisies de façon qu'elles s'alignent avec les

étapes d'intégration du véhicule au sein d'une entreprise. Cela comprend des mesures comme la formation des travailleurs, l'installation de capteurs de détection et l'intégration de système de communication avancé. Enfin, pour la phase d'utilisation, l'objectif est de garantir le fonctionnement des VAI en toute sécurité dans l'environnement de travail. Les solutions de prévention de cette phase visent à minimiser les dangers liés aux pannes éventuelles, à des surveillances en continu ainsi que d'autres dangers lors de l'utilisation de ces véhicules.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le but principal de ce chapitre est de présenter et de discuter des résultats de la recherche. Ce chapitre comporte 4 sections principales. D'abord, la section 4.1 détaille les résultats de la simulation du VAI. Après, la section 4.2 présente l'outil réalisé pour les experts en SST. Ensuite, la section 4.3 montre les solutions de prévention pour chaque famille de danger en lien avec les VAI pour les trois phases (conception, intégration et utilisation du VAI). Enfin, la section 4.4 présente le portrait des solutions de prévention des dangers en lien avec les VAI.

4.1 Résultats de la simulation

Le VAI détecte les obstacles avec les rayons laser et les identifie avec des couleurs, comme présentée sur la Figure 4.1. Le VAI détecte les murs tout en indiquant la direction qu'il emprunte par une flèche rouge.

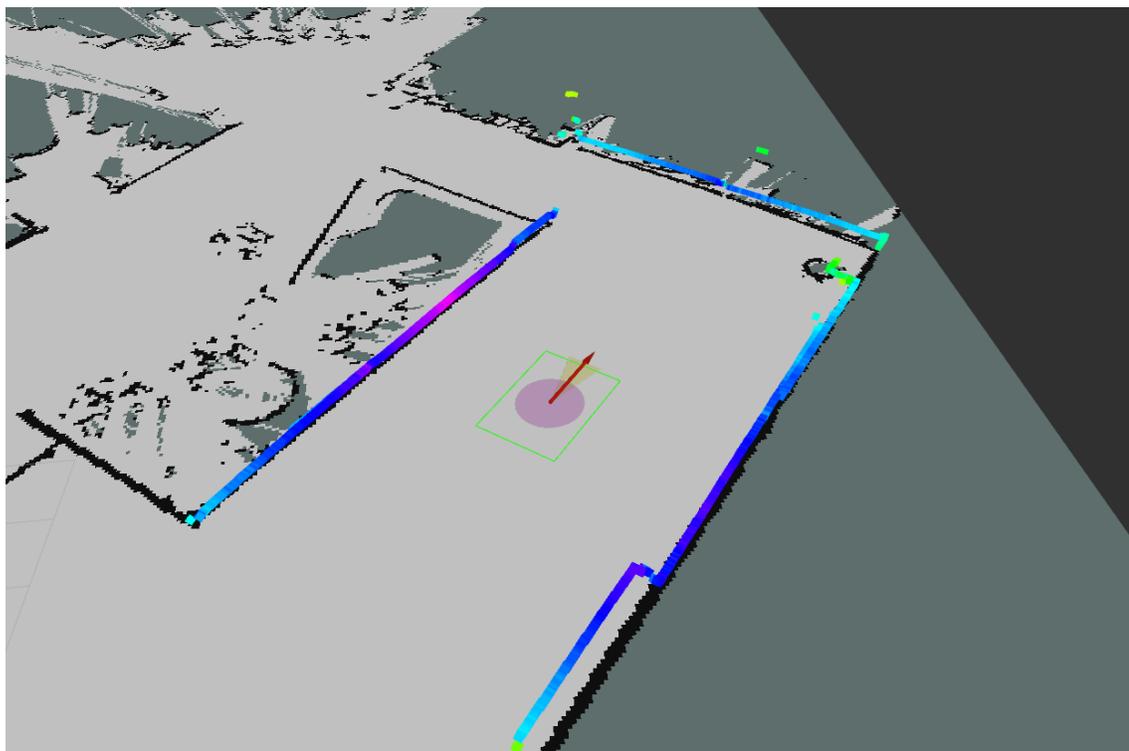


Figure 4.1 : Détection du mur par le VAI

Les taches noires représentent les données de la carte. Le chemin planifié du VAI peut être indiqué par les flèches violettes pour connaître le trajet qui sera réalisé en avance, comme indiqué sur la figure 4.2.

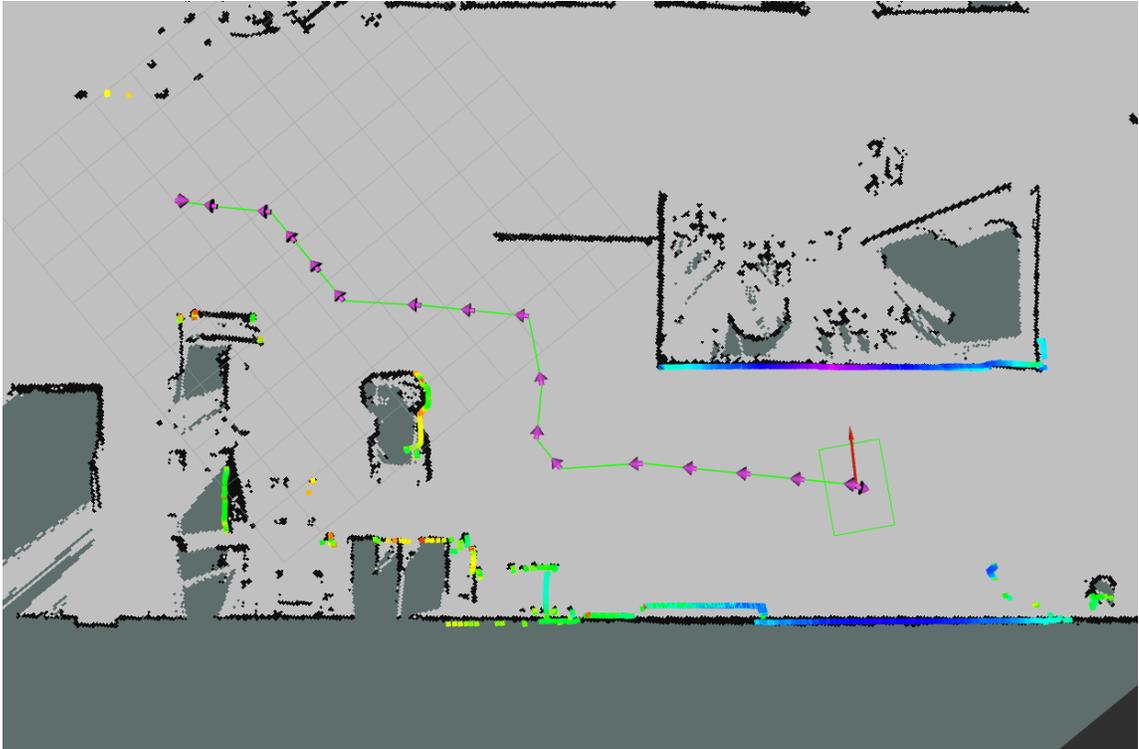


Figure 4.2 : Chemin planifié du VAI

Le Tableau 4.1 présente l'évaluation des scénarios réalisés.

Tableau 4.1 : Évaluation des scénarios réalisés sur le VAI

| Scénarios | Descriptions | Dangers étudiés | Commentaires |
|------------------------------|--|---------------------------------------|---|
| Obstacle sur la voie | Placer un objet sur la voie du VAI pour voir comment il réagit lorsqu'il rencontre un obstacle. | Collision | Le VAI, grâce à son système Lidar, s'arrête à une distance sécurisée lorsqu'il détecte un obstacle interceptant ses faisceaux laser, ce qui lui permet de réagir à des objets de différentes tailles et hauteurs, tant qu'ils intersectent ces faisceaux. Le temps de réaction du véhicule est rapide, et après la détection, il ajuste sa trajectoire pour atteindre sa destination en évitant l'obstacle. |
| Collision | Placer un obstacle sur la trajectoire du VAI pour vérifier sa réaction lorsqu'il entre en collision avec celui-ci. | Collision due à une zone aveugle | Le VAI s'arrête au moment du contact avec l'obstacle. Après avoir retiré l'objet, le véhicule reprend son chemin. |
| Objet instable | Placer un objet de manière instable sur la plateforme du VAI. | Chute d'objet | Le VAI continue de circuler jusqu'à ce que l'objet placé de manière instable chute. À ce moment, VAI s'arrête immédiatement, ayant détecté la chute de l'objet. |
| Détection d'un piéton | Tester la capacité du VAI à détecter un piéton sur la voie et l'éviter. | Collision due à l'inattention humaine | Lorsque le VAI a détecté la présence d'un piéton, il s'est arrêté. Le véhicule a changé de direction pour reprendre son chemin. |

| Scénarios | Descriptions | Dangers étudiés | Commentaires |
|---------------------------------|--|---------------------------------------|--|
| Panne d'alimentation | Simuler une panne d'alimentation électrique de l'AGV pour vérifier comment il réagit | Système de contrôle du VAI déconnecté | Le VAI s'est arrêté après avoir coupé le courant. |
| Problème de connectivité | Simuler une perte de connexion entre l'AGV et le système de contrôle pour tester la capacité de l'AGV à fonctionner de manière autonome. | Système de contrôle du VAI déconnecté | Lorsque le VAI a perdu de connexion, il s'est arrêté progressivement et en toute sécurité. |

Cette étude a soumis le VAI à une série de six scénarios de simulation conçus pour évaluer sa réactivité et ses performances dans des situations critiques. En général, les résultats ont démontré que le véhicule est capable de maintenir un niveau de sécurité élevé tout en étant flexible et adaptable. Dans diverses situations, le VAI a fait preuve de réactivité vu sa capacité à détecter de façon rapide les obstacles sur sa trajectoire. Le véhicule était également capable d'ajuster sa vitesse ou sa trajectoire pour éviter les collisions. Il a également montré une bonne stabilité à déplacer les objets sur sa plateforme.

Le VAI a démontré une capacité excellente à détecter les piétons sur sa voie et à les éviter. Cela renforce la sécurité des travailleurs dans un environnement de travail partagé. Même lors de la réalisation de pannes d'alimentation simulées et de pertes de connectivité, le véhicule a réagi conformément à sa programmation. Il était capable de s'arrêter en toute sécurité. Les résultats obtenus montrent la capacité du VAI à être un outil fiable et sûr dans un environnement de travail.

4.2 Outil de collecte de données pour les experts en SST qui s'intéressent aux VAI

L'outil réalisé est sous forme d'un questionnaire (Annexe 1) qui contient sept sections :

- Les données personnelles : cette partie contient les questions sur la personne qui répondra au questionnaire. Ces questions concernent les informations personnelles du participant;

- Les données de l'entreprise : cette partie a pour but d'obtenir des informations sur l'entreprise dans laquelle le répondeur travaille;
- Le cadre législatif et réglementaire : cette partie comprend des questions en lien avec les règlements de la SST, les normes et les lois applicables en SST;
- La prise en charge de la SST : cette partie a pour but d'évaluer la prise en charge en SST dans l'entreprise;
- Les données sur les VAI : cette partie contient des questions générales sur les VAI utilisés dans l'entreprise;
- Les événements apparus au sein de l'entreprise en lien avec les VAI : cette partie contient des questions sur les différents dangers en lien avec les VAI. Le but est de voir si chaque danger identifié dans le portrait des dangers est apparu au sein de l'entreprise lors de l'utilisation de ces véhicules;
- L'état de santé des travailleurs : cette partie se concentre sur les risques psychosociaux et mentaux en lien avec les VAI.

Le questionnaire réalisé comporte en tout 50 questions, dont environ 60 % sont de type fermé. Le questionnaire contient des questions qui concernent tous les dangers identifiés dans le portrait des dangers liés aux VAI. Ce questionnaire permet d'identifier les dangers qui apparaissent dans l'environnement de travail lors de l'utilisation des VAI. Le répondant doit faire des choix de réponses dans une liste à cocher. Pour certaines questions, le répondant doit donner son choix avec des explications. Le questionnaire est élaboré en format électronique par une application conçue à l'UQTR. Le questionnaire est vérifié par les membres de l'équipe afin de s'assurer que les questions soient claires et de valider son fonctionnement dans la plateforme. Les personnes qui peuvent répondre au questionnaire sont soit des experts de la SST ou des gestionnaires de la SST d'une entreprise qui s'intéressent aux VAI. Les chercheurs ainsi que les industriels bénéficieront et utiliseront ces données pour une bonne gestion des dangers en lien avec les VAI.

4.3 Solutions de prévention des dangers en lien avec les VAI

Malgré les défis rencontrés dans la collecte de données auprès des entreprises, la prévention des dangers liés aux VAI est restée constante. La technologie des VAI évolue rapidement, la méthodologie est donc poursuivie en identifiant les mesures de prévention possibles, en se basant sur les données disponibles et l'expertise dans le domaine de la sécurité au travail. En l'absence de réponses complètes des entreprises, une approche proactive a été entreprise pour recueillir des informations pertinentes et développer des recommandations préliminaires. L'approche s'est concentrée sur l'analyse de la documentation existante, y compris les normes de sécurité internationales, les recherches pertinentes et les meilleures pratiques de l'industrie.

Au cours de cette phase, une série de mesures préventives peuvent être appliquées aux dangers liés aux VAI qui sont identifiés dans le portrait. Ces mesures comprennent des pratiques de conception, une maintenance préventive, des programmes de formation pour les travailleurs, des protocoles de sécurité lors de l'intégration de VAI dans les environnements de travail, etc. Même si ces précautions sont élaborées sans données provenant des entreprises, elles reposent sur de bonnes connaissances en matière de sécurité et de technologie. Ces recommandations serviront de point de départ à des discussions plus approfondies avec les entreprises utilisant des VAI. Le but est d'adapter et de personnaliser les solutions de sécurité en fonction de leurs besoins spécifiques.

4.3.1 Utilisation de système de détection

L'utilisation d'un système de détection joue un rôle principal, quel que soit le type de VAI. Intégrer ces systèmes dans la conception des VAI permettra la détection de présence d'un travailleur ou d'un obstacle dans l'environnement de travail. Les systèmes de détection sont également très avancés, utilisant des technologies telles que la fusion des données de capteurs multiples, comme les caméras et les lidars. Ces technologies peuvent être utilisées pour assurer une détection précise. Les systèmes de détection sont aussi utiles en ce qui concerne les zones aveugles. Le VAI sera capable de détecter un travailleur ou un obstacle dans les zones hors de vue du véhicule (ISO 12100 (2010)).

Installer des caméras supplémentaires pourra améliorer la visibilité des zones aveugles. Cela permettra de mieux surveiller l'environnement et de réduire les risques de collision (ISO 5006 (2017b)).

La détection précoce des obstacles et des travailleurs sur la trajectoire permet au système de détection de déclencher des arrêts d'urgence ou des arrêts progressifs pour éviter les collisions et minimiser le risque de chute d'objets tenu sur le VAI. L'intégration de systèmes de détection au VAI est aussi utile pour détecter si un produit est mal placé dans le rayonnage, ce qui permettra de prendre les mesures appropriées pour éviter les chutes d'objets (ISO 10218-1 (2011b)). Lors de la phase d'intégration, il est important d'effectuer des tests de fonctionnement régulier de ces systèmes pour vérifier leur efficacité. Le but est de s'assurer que les systèmes de détection d'obstacles fonctionnent correctement et sont bien intégrés au VAI.

Lors de la conception, mettre des capteurs capables de repérer des obstacles à différents niveaux de surface permettra au VAI de ralentir ou d'éviter les obstacles avant une collision (ISO 15622 (2018a)). Lors de la phase d'intégration des VAI, installer des capteurs qui détectent les obstacles environnants permet de détecter les zones dégradées et d'ajuster la vitesse ou la trajectoire pour éviter des collisions ou des dommages (ISO 10218-1 (2011b)). À l'utilisation des VAI, intégrer des capteurs de détection de charge électrostatique dans les VAI permet de surveiller les niveaux de charge et déclencher des mesures préventives, comme la réduction de la vitesse si le niveau de charge est élevé (IEC 61340-5-1 (2016)).

Pour les VAI qui travaillent dans un environnement externe, il faut appliquer des revêtements hydrophobes sur les surfaces de caméras et de capteurs pour éviter l'adhérence de l'eau ou des particules de poussières (Pao, 2019), ce qui facilite l'autonettoyage des appareils visuels. Les caméras et les capteurs peuvent être aussi positionnés de manière à réduire l'exposition aux éléments, comme la pluie battante ou les projections de poussière, tout en maintenant un champ de vision optimal (ISO 16750-2 (2023d)).

Installer des capteurs météorologiques pour détecter les conditions de vent fort et les transmettre aux VAI permettra aux à ceux-ci d'ajuster automatiquement leur vitesse et leur trajectoire en fonction des prévisions météorologiques (ISO 15622 (2018a)).

4.3.2 Interface et communication entre les travailleurs et les VAI

L'intégration des technologies de communication avancées (Wi-Fi ou RFID) permet aux VAI de détecter la présence de travailleurs ainsi que d'autres véhicules dans l'environnement de travail (ISO 17757 (2019a)). Dans la phase de conception, élaborer des interfaces conviviales et intuitives facilite l'interaction entre les VAI et les travailleurs, ce qui réduit le risque d'inattention. En cas de risque de collision, des panneaux d'avertissement visuels ou auditifs peuvent être utilisés pour alerter les travailleurs (ISO 13482 (2014c)). Ces systèmes de communication permettent également aux opérateurs de donner des instructions et de recevoir des informations en temps réels. Aussi, pour faciliter la collaboration des travailleurs avec les VAI et réduire des risques psychosociaux, les systèmes de communication doivent être conviviaux et fiables (ISO 9241-302 (2008)).

4.3.3 Signalisation et contrôle des zones de travail dangereuses

D'abord, lors de la conception, intégrer des dispositifs de sécurité peut arrêter les VAI de remorquage si des travailleurs se trouvent dans la zone dangereuse. Ces dispositifs de sécurité peuvent être des barrières lumineuses, des interrupteurs d'arrêt d'urgence ou des capteurs de proximité (ISO 3691-4 (2023b)). Ensuite, afin d'améliorer la visibilité des VAI lors de leur utilisation, on peut programmer ces véhicules pour qu'ils émettent des signaux visuels clairs (ISO 3864-1 (2011a)). Enfin, il est important de contrôler l'environnement de travail pour sécuriser les VAI. Le but est d'éviter les zones où le sol est isolé ou peu conducteur. Des itinéraires peuvent être programmés pour contourner ces zones ou réduire la vitesse du VAI en conséquence (IEC 60079-32-1 (2017)).

L'autre partie se concentre sur les travailleurs. Premièrement, on limite l'accès aux zones de travail dangereuses. Cela peut être fait en utilisant des barrières physiques, des dispositifs de contrôle d'accès ou des dispositifs de signalisation.

Ces dispositifs permettent d'avertir les travailleurs des zones où se trouvent les VAI et d'éviter tout contact accidentel (CSA Z432-16 (2021) et ANSI/ITSDF B56.5 (2019)). Deuxièmement, mettre en place une signalisation claire et des marquages visuels qui indiquent les zones aveugles du VAI. Le but est d'alerter les travailleurs des zones qui peuvent être dangereuses s'ils entrent en contact avec un VAI (ANSI/ITSDF B56.5 (2019)). Troisièmement, installer des marquages de sécurité qui permettent d'indiquer aux travailleurs les différentes zones dangereuses avec les précautions à prendre en considération (ISO 3864-2 (2016b)).

Pour finir, on peut établir une communication claire entre les opérateurs des VAI et les autres travailleurs qui se trouvent dans les mêmes zones de travail. Les opérateurs peuvent utiliser des signaux visuels ou sonores pour avertir les travailleurs de la présence des VAI à proximité (ANSI/ITSDF B56.5 (2019)). Fournir des alertes visuelles ou sonores aux opérateurs des VAI permet de réagir rapidement afin de prendre des mesures de sécurité supplémentaires. Les mesures de sécurité peuvent être comme la réduction de la vitesse ou l'arrêt temporaire du VAI afin d'éviter des dangers comme la collision (ISO 15622 (2018a) et ISO 19649 (2017d)). L'intégration de ce genre de système d'alerte visuel ou sonore peut aider également à attirer l'attention des travailleurs sur des événements importants, ce qui permet de réduire la surcharge mentale (ISO 3691-4 (2023b)).

Il est possible également d'équiper les VAI de dispositifs d'avertissement visuels ou sonores pour alerter les travailleurs de la présence du véhicule à proximité (ISO 12100 (2010)). Intégrer des réflecteurs ou des surfaces réfléchissantes sur les VAI améliore la visibilité dans les environnements sombres, ayant une faible visibilité, ce qui aide à signaler la présence de ces véhicules (ANSI/ISEA 107 (2020)).

4.3.4 Formation et sensibilisation

Les VAI interagissent souvent avec les travailleurs. Il faut donc former ces travailleurs à l'utilisation correcte des VAI, à la compréhension de leurs fonctionnalités et de leurs limites, ainsi qu'aux procédures de sécurité associées. Selon NIOSH (2001) c'est une étape essentielle lors de l'intégration et l'utilisation des VAI.

Les dangers en lien avec les VAI, qui imposent la mise en place d'une formation pour les travailleurs et opérateurs, sont les suivants :

- Les dangers physiques : Fournir des formations approfondies aux opérateurs et travailleurs de manière à travailler en toute sécurité avec les VAI (NIOSH (2001), ISO 3691-4 (2023b) et OSHA 29 CFR 1910.1053 (2018)). La formation sur les risques associés à la présence des VAI dans leur environnement de travail ainsi que sur les mesures de sécurité à prendre en considération pour éviter les accidents de travail.
- Les dangers technologiques : Fournir des formations aux responsables informatiques en charge de la gestion des VAI afin d'être conscients des risques comme les cyberattaques et des mesures de prévention à prendre en considération (ISO/IEC 27032 (2023a)). Pour ces types de dangers, la formation des opérateurs sera essentielle, car cela concerne la sécurité des données, les procédures à suivre en cas de déconnexion des VAI, l'utilisation des systèmes intégrés de manière sécurisée et l'identification des pertes de contrôle potentielle (NIST SP 800-50 (2003) et ISO/IEC 27032 (2023a) et ISO 22301 (2019e)). Aussi, sensibiliser les travailleurs est crucial en ce qui concerne les risques de cyberattaques, les bonnes pratiques en matière de sécurité informatique, la reconnaissance des courriels d'hameçonnage et des logiciels malveillants (NIST SP 800-50 (2003)).
- Les dangers ergonomiques : Fournir des formations adéquates aux travailleurs sur les bonnes pratiques de manipulation afin d'éviter les mouvements répétitifs (ISO 11226 (2000)). Concernant les tâches administratives liées à la gestion des VAI, des formations sur les étirements et les mouvements à effectuer pendant et après le travail doivent être fournies. Ces formations sont essentielles pour prévenir les problèmes ergonomiques associés à la position assise et à l'utilisation prolongée des ordinateurs ou des autres dispositifs (ISO 6385 (2016a)).

- Les dangers psychosociaux et mentaux : Lors de l'intégration des VAI, réaliser une formation initiale complète sur le fonctionnement, les caractéristiques et les bonnes pratiques des VAI. Le point important est de s'assurer que les travailleurs comprennent bien les procédures à suivre et les réactions à avoir en cas de situations imprévues (ISO 12100 (2010)). Fournir des formations sur la santé mentale aidera au niveau de la gestion du stress et de l'anxiété (ISO 45001 (2018b)). Aussi, intégrer des formations à la collaboration et à la communication entre les travailleurs et les VAI, facilitera la collaboration et permettra de maintenir une communication entre collègues même en travaillant de manière autonome (ISO 22320 (2018e)). Suivre des formations en continu permettra d'adapter les travailleurs avec les nouvelles situations et les défis rencontrés dans l'utilisation quotidienne (ISO 22320 (2018e)). Ainsi, partager des instructions claires et concises et avoir un accès facile aux procédures à suivre en cas de situations variées évitera la confusion des travailleurs (ISO 9241-110 (2020b)).

En plus de la formation des travailleurs, la sensibilisation des travailleurs aux dangers est importante. Cela permet d'optimiser la cohabitation entre les travailleurs et les VAI et de faire attention aux différents dangers physiques (NIOSH (2001)). Les travailleurs peuvent être aussi sensibilisés aux problèmes de santé mentale et à la gestion du stress en appliquant par exemple des méthodes de gestion des émotions et des techniques de relaxation (ISO 45001 (2018b) et ISO 10075-1 (2017c)). Afin de réduire les risques ergonomiques, les travailleurs peuvent être encouragés à signaler tout inconfort ou problème, mais aussi les sensibiliser aux bonnes pratiques ergonomiques afin de maintenir une posture assise saine (ISO 11226 (2000) et ISO 6385 (2016a)).

4.3.5 Communication et surveillance

Les solutions de prévention de cette partie se concentrent uniquement sur la phase d'utilisation du VAI. D'abord, appliquer des inspections régulières des rayonnages est recommandé pour éviter les situations dangereuses. Ces inspections doivent être réalisées avant chaque utilisation du VAI.

Il reste également important de vérifier l'état des dispositifs de fixation ainsi que des objets ou des produits transportés par les VAI. Puis, différents systèmes de surveillances peuvent être mis en place. Des surveillances en temps réel pour deux raisons : la première est pour surveiller l'état des surfaces de circulation et détecter les dégradations ou des obstacles imprévus, ce qui permet de réagir rapidement aux conditions changeantes de la route (ISO 19649 (2017d)). La deuxième raison est pour détecter toute déconnexion ou dysfonctionnement des composants électroniques pendant la circulation. Les opérateurs peuvent donc réagir rapidement si un problème surgit (ISO 19649 (2017d)).

La surveillance des arrêts d'urgence aide à détecter tout problème de fonctionnement et à prendre des mesures correctives nécessaires (NIOSH (2001)). La surveillance du comportement des opérateurs aide à l'identification des schémas d'inattention et d'appliquer des mesures correctives comme des séances de formation ou des rappels sur les pratiques de sécurité. Aussi, surveiller la façon dont un VAI évite un obstacle peut détecter d'éventuelles erreurs ou défaillances dans le système. La mise en place d'un système de surveillance de la sécurité permet de détecter des problèmes potentiels liés aux défauts de conception du VAI. Les opérateurs doivent donc signaler tout problème de sécurité rencontré lors de l'utilisation du VAI. Cela aidera à résoudre le problème rapidement. Ensuite, effectuer des surveillances continues aide à détecter rapidement toute situation dangereuse impliquant les travailleurs (NIOSH (2001)). La mise en place de ce système de surveillance se fait pour superviser en permanence les mouvements des VAI (ISO 3691-4 (2023b)). On peut également effectuer une surveillance continue pour surveiller en temps réel les conditions météorologiques et l'environnement, qui peut être effectué en intégrant des capteurs supplémentaires pour les VAI de l'extérieur. Les véhicules peuvent donc ajuster leur comportement en fonction des conditions extérieures (ISO 26262-11 (2018d)).

Enfin, la communication entre les opérateurs et les travailleurs joue un rôle crucial pour rester vigilant aux différents dangers liés aux VAI à cause des zones aveugles. Cela peut être fait en utilisant des signaux visuels ou sonores afin d'informer les travailleurs de la présence des VAI en mouvement (ANSI B56.1 (2020)).

On peut également mettre en place des protocoles de communication clairs entre les travailleurs et les opérateurs en ce qui concerne les remorqueurs à guidage automatiques. Le but de cette dernière est de faciliter une coordination sûre des activités de manutention (ISO 12100 (2010)). La communication avec les travailleurs permet également de les sensibiliser aux caractéristiques et au comportement des VAI. Ainsi, les travailleurs seront conscients des actions du VAI. Cela aide les travailleurs à mieux anticiper leurs déplacements en toute sécurité autour des VAI.

En ce qui concerne les dangers psychosociaux, on peut établir des programmes de soutien psychosocial pour les travailleurs afin de bien les former. Cela peut être sous forme des sessions de conseil, des groupes de discussion ou de mesures d'accompagnement. Le but de ces programmes est de les aider à gérer le stress, l'anxiété et d'autres problèmes émotionnels liés au travail (ISO 10075-3 (2004)). Les travailleurs doivent se sentir à l'aise à demander de l'aide et de signaler les problèmes psychosociaux en cas de besoin. Pour cela, il faut encourager la communication ouverte entre les travailleurs et le personnel de supervision (ISO 45003 (2021e)). Les opérateurs peuvent également maintenir une communication proactive avec les VAI. Ce type de communication permet d'anticiper les actions et les mouvements de ces véhicules. Ce qui va aider à éviter des situations de conflit et de faciliter la coordination des tâches (ISO 45001 (2018b)). L'utilisation des outils de communication encourage les travailleurs à rester connectés et à maintenir une communication régulière. Ces outils peuvent être des radios, des téléphones portables ou des applications de messagerie (ISO 22320 (2018e)).

4.3.6 Gestion de la sécurité et du contrôle des VAI

Les VAI doivent être conçus avec un système de contrôle de la vitesse adaptatif. La vitesse du véhicule sera alors ajustée automatiquement en fonction de la proximité d'obstacles ou de travailleurs. Le but ici est de permettre au VAI d'éviter efficacement les contacts avec les travailleurs, et donc de réduire le risque de collision. Lors de l'intégration des VAI, les systèmes de contrôle de la vitesse adaptatif permettent également d'ajuster la vitesse automatiquement en fonction des conditions de la surface et de la dégradation de la route.

Cela garantit une maintenance de conduite sûre et stable (ISO 15622 (2018a)). On peut également intégrer une fonction de limitation de vitesse automatique pour les VAI lors de la détection d'un obstacle sur la trajectoire (ISO 10218-1 (2011b)). Aussi, il est possible de réduire les risques liés aux mouvements instables ou imprévisibles causés par des vents forts. La solution de celle-ci est d'implémenter des limites de vitesse maximale pour les VAI (ISO 19649 (2017d)).

Lors de la conception, il est important d'intégrer aux VAI des systèmes d'arrêt progressif. Ces systèmes ralentissent en douceur et de manière contrôlée lorsqu'un VAI s'arrête afin de réduire les chocs et les secousses qui pourrait entraîner les chutes d'objets (ISO 12100 (2010)). La conception des VAI avec des systèmes d'évitement d'obstacles permet d'anticiper et réagir efficacement aux obstacles. Ces systèmes peuvent être conçus avec des algorithmes de détection et de réaction avancés, mais il est préférable que ces algorithmes soient testés pour détecter et éviter une variété d'obstacles (ISO 13482 (2014d)). L'étude des trajectoires approfondies reste également essentielle pour s'assurer que les VAI évitent les obstacles de manière efficace et en toute sécurité. La configuration de l'environnement de travail et l'ajustement des trajectoires en fonctions des conditions réelles doivent également être pris en considération dans cette étude (NIOSH (2001)). Les systèmes d'assistance à la prise de décisions aident également les opérateurs à identifier les situations à risque de collision et à prendre des mesures préventives appropriées. Ces systèmes peuvent utiliser des alertes automatiques en cas de risque imminent de collision (ISO 9241-210 (2019c)).

Afin de s'assurer que les VAI fonctionneront sécuritairement, réaliser une évaluation approfondie des risques dès la phase de conception des VAI est une démarche cruciale. Cette démarche permet d'identifier et de corriger les défauts de conception susceptibles de conduire à des collisions (ISO 12100 (2010)). Le choix des matériaux est aussi essentiel lors de la conception du VAI. Concevoir ces véhicules avec des matériaux de roues appropriés assure une bonne adhérence sur les surfaces lisses ou glissantes (ISO 5006 (2017b)). Intégrer des capteurs d'adhérence sur les roues des VAI permet de surveiller les conditions de la surface et adapter le comportement du véhicule en conséquence (ISO 15622 (2018a)).

Les VAI doivent être équipés de systèmes de suspension adaptés. Cela permet d'absorber les chocs et les vibrations lors de leur circulation sur des surfaces dégradées. Ces systèmes améliorent la stabilité et le contrôle du VAI (ISO 13482 (2014c)). Il est aussi important d'utiliser des matériaux qui favorisent la conduction électrique et réduisent l'accumulation de charges électrostatiques. Les matériaux isolants doivent être évités parce qu'ils peuvent aggraver le problème (ANSI/ESD STM97.1 (2015)).

Lors de l'intégration des VAI, mettre en place des systèmes de guidage dans les VAI permet de les aider à se déplacer de manière sûre et d'éviter les collisions (ISO 12100 (2010)). Il est également essentiel d'évaluer l'environnement de travail, afin d'identifier les surfaces lisses ou glissantes pour mettre en place des mesures préventives appropriées (ISO 22867 (2021c)). On peut également intégrer des cartes numériques précises qui incluent les variations de niveaux de surface. Les VAI seront capables d'anticiper les changements de niveaux et d'ajuster leur trajectoire en conséquence (ISO 19091 (2019d)). Il faut également isoler les composantes électroniques sensibles en les plaçant dans des boîtiers ou des compartiments résistant aux vibrations. Ce qui évitera les interférences électromagnétiques et mécaniques qui pourraient compromettre leur fonctionnement (ISO 16750-4 (2023e)). Les VAI doivent être mis à la terre correctement lors de leur intégration. Les connexions de mise à la terre doivent être régulièrement inspectées pour maintenir leur efficacité (ANSI/ESD S6.1 (2019)). Aussi, la mise en place d'une programmation adaptative aux VAI permet aux véhicules de réagir aux alertes météorologiques, et cela, en adaptant leur comportement, leur vitesse et leur itinéraire pour éviter les zones potentiellement dangereuses en cas de vents forts (ISO 15622 (2018a)).

Lors de l'utilisation des VAI, équiper ces véhicules de dispositifs d'arrêt d'urgence aide à les arrêter rapidement en cas de risque de collision (ISO 12100 (2010)). On peut aussi envisager l'utilisation d'aide à la conduite. Cette dernière rend les VAI capables de détecter de manière autonome les obstacles et les travailleurs. Le but est d'éviter tout risque de collision en appliquant des mesures préventives. Ces mesures peuvent être des alertes visuelles ou sonores, ou même activer des arrêts d'urgence (ISO 3691-4 (2023b)).

Pour les VAI de l'extérieur, on peut les programmer de façon à activer des modes spécifiques en cas de forte pluie ou de mouvements de poussière. Ces modes peuvent inclure la réduction de vitesse, l'augmentation de la distance de suivi et l'activation d'un système d'essuyage automatique (ISO 26262-1 (2018c)).

En ce qui concerne les VAI de désinfection UV, il faut d'abord effectuer une évaluation approfondie des risques associés à l'utilisation de VAI de désinfection UV. Puis, mettre en œuvre des contrôles appropriés pour réduire l'exposition aux rayonnements UV (ISO 45001 (2018b)). Ensuite, concevoir ces véhicules avec des dispositifs de limitation de rayonnements comme des barrières physiques ou des filtres. Cela empêche la propagation des rayonnements UV au-delà de la zone de désinfection (IEC 60335-2-109 (2016) et IEC 62471 (2006)). Enfin, mettre en place des contrôles administratifs comme des procédures d'utilisation sécuritaire des VAI de désinfection UV. Le but est d'assurer une manipulation appropriée et de limiter l'exposition des travailleurs aux rayonnements UV (NIOSH (2001)).

4.3.7 Tests de sécurité pour la prévention des risques liés aux VAI

Plusieurs tests peuvent être effectués pour évaluer les VAI pendant la conception et lors de l'intégration de ces véhicules. Le Tableau 5.2 représente les différents tests à appliquer pour prévenir les différents dangers liés aux VAI pendant la phase de conception.

Tableau 4.2 : Tests de sécurité pour la prévention des dangers liés aux VAI pendant la phase de conception

| Tests | Objectifs du test | Références |
|----------------------------|--|------------------------|
| Tests de sécurité | Vérifier tout au long du processus de conception que les VAI répondent aux normes de sécurité applicables. Identifier et résoudre ainsi les défauts de conception qui pourraient entraîner des collisions. | ISO 16001-1 (2017a) |
| Tests de résistance | Assurer que les dispositifs de fixation du VAI peuvent supporter la charge prévue et qu'ils maintiennent en toute sécurité les objets pendant le déplacement du VAI. | ISO 12100 (2010) |
| | Évaluer la capacité du système de communication des VAI à faire face à des perturbations du réseau comme des arrêts ou des interférences Wi-Fi. | IEEE Std 802.11 (2016) |

Le Tableau 5.3 représente les différents tests à appliquer pour prévenir les différents dangers liés aux VAI pendant la phase d'intégration.

Tableau 4.3 : Tests de sécurité pour la prévention des dangers liés aux VAI pendant la phase d'intégration

| Tests | Objectifs du test | Références |
|-----------------------------|--|------------------------|
| Tests de performance | Assurer que les systèmes d'évitement d'obstacles qu'ils fonctionnent correctement et répondent aux normes de sécurité. | ISO 10218-2 (2011c) |
| | Évaluer la capacité des VAI à circuler en toute sécurité sur différentes surfaces telles que les surfaces lisses et glissantes. | ISO 7096 : (2020a) |
| Tests de sécurité | Effectuer des tests de sécurité approfondis sur les systèmes informatiques et les logiciels du VAI. Cela peut inclure les tests de pénétration afin de détecter les vulnérabilités potentielles. | NIST SP 800-115 (2021) |
| Tests d'intégration | Assurer que le système de communication des VAI fonctionne correctement et reste connecté au réseau Wi-Fi pendant l'utilisation. | ISO/IEC 30141 (2018) |

| Tests | Objectifs du test | Références |
|---|--|-------------------------|
| Tests d'interopérabilité | Vérifier la compatibilité entre les VAI et le système de contrôle des VAI et garantir une intégration sans perte de contrôle. | ISO 21217 (2020c) |
| Tests de résistance aux vibrations | Assurer que les connecteurs et les dispositifs électroniques peuvent fonctionner correctement dans des conditions de vibrations similaires à celles rencontrées lors de la circulation. | ISO 16750-3 (2007) |
| Tests de calibrage des capteurs | Assurer que les capteurs sont bien équilibrés pour détecter les variations de niveaux de surface. Garantir que les capteurs réagissent de manière adéquate aux obstacles en niveaux de surface différents. | ISO 15622 (2018a) |
| Tests d'éclairage | Assurer que l'éclairage intégré aux VAI répond aux normes d'intensité lumineuse appropriées ainsi qu'aux besoins de visibilité. | ANSI/IES RP-8-18 (2018) |

| Tests | Objectifs du test | Références |
|--|---|-------------------|
| Tests de résistance aux intempéries | Vérifier la résistance des dispositifs de vision des VAI aux conditions météorologiques difficiles, y compris la pluie et la poussière. Assurer également que ces dispositifs continuent de fonctionner correctement dans ces environnements. | ISO 20653 (2023c) |

4.3.8 Vérification des fixations d'objets et contrôle des rayonnages pour les VAI

Les VAI doivent être conçus de manière à être capables de détecter les rayonnages et les étagères présents dans l'environnement de travail. Ces véhicules doivent également être programmés pour naviguer en sécurité autour des rayonnages sans les heurter ou provoquer des chutes d'objets (ISO 3691-5 (2014b)). Les rayonnages et les étagères doivent être conformes aux normes de sécurité et de stabilité. Il est donc nécessaire d'effectuer des inspections régulières pour détecter tout défaut ou mauvais placement des objets. La négligence de cette démarche risque d'entraîner des chutes d'objets ou de produits dangereux (RMI/ANSI MH16.1 (2012)). Appliquer une politique de rangement organisée dans les rayonnages permet d'éviter le désordre et les objets mal placés. Cette pratique minimise les chutes d'objets et donc facilite la navigation des VAI.

En ce qui concerne la transport des objets par les VAI, la mise en place de dispositifs de fixation robuste et fiable sur ces véhicules est essentielle. Ces dispositifs vont assurer une bonne immobilisation des objets ou des produits transportés. Ils doivent être conçus pour résister aux mouvements et aux secousses des VAI pendant leur fonctionnement (ISO 3691-5 (2014b)), mais il reste également essentiel de s'assurer que les objets sont bien

fixés correctement sur les VAI. Cette étape peut être faite par une vérification visuelle. Des mesures correctives seront nécessaires si des défauts de fixation sont identifiés.

4.3.9 Conceptions innovantes pour la prévention des risques liés aux VAI

Concevoir les VAI de manière ergonomique permet de minimiser les risques de collision. Cela peut être avec des dispositifs de détection d'obstacles et des systèmes de guidage pour éviter les collisions (ISO 6385 (2016a)). Les dispositifs de détection avancés comme les capteurs de proximité, les caméras ou les radars aident à identifier la présence des travailleurs dans les zones de manutentions, même derrière ou entre les chariots (ISO 12100 (2010)). Installer des pare-chocs robustes sur les VAI lors de la conception réduit le risque de déversement d'objets. Ces pare-chocs permettent aux VAI d'absorber les chocs de collisions potentielles (ISO 26262-1 (2018c)).

En ce qui concerne l'environnement de travail, on peut opter pour des connecteurs et des dispositifs électroniques robustes et résistants aux vibrations, ce qui réduira les risques de dysfonctionnements ou de déconnexions dues aux mouvements du VAI (ISO 6469-3 (2021b)). On peut également intégrer des systèmes de montage antivibratoire pour les composants électroniques sensibles. Cela atténuera les vibrations et protégera les dispositifs électroniques des dégâts causés par les mouvements du VAI (ISO 7096 (2020a)). Ensuite, le VAI doit être conçu en intégrant des systèmes de mise à la terre efficaces afin de pouvoir décharger les charges électrostatiques accumulées. Cela peut inclure l'utilisation de composants conducteurs et de chemins de mise à la terre appropriés (ANSI/ESD S20.20 (2014)). Intégrer un système d'éclairage suffisamment puissant et bien réparti sur les VAI garantit une vision claire dans différentes conditions d'éclairage. L'utilisation de lampes à LED, à haute intensité lumineuse, peut s'impliquer (ISO 23601 (2020d)).

Pour les VAI de l'extérieur, on peut leur intégrer des éléments aérodynamiques qui réduisent la prise au vent et la résistance. Cela réduit les effets des vents forts sur la stabilité des VAI (ISO 6469-1 (2019b)).

Aussi, concevoir des systèmes d'essuyage automatique des caméras, capteurs et autres dispositifs de vision des VAI élimine l'eau, la pluie ou la poussière d'une manière rapide, ce qui aide à garder un champ de vision clair (ISO 2575 (2021f)).

La conception peut se concentrer également sur la prévention des dangers psychosociaux. Premièrement, concevoir des interfaces utilisateur des VAI de façon à fournir des informations claires, compréhensibles et intuitives pour les opérateurs. Il est possible d'utiliser des symboles universels et des icônes explicites pour réduire les incertitudes et les situations stressantes (ISO 9241-210 (2019c)). Deuxièmement, on peut intégrer des interfaces de communication entre les opérateurs et les VAI de manière à faciliter la collaboration et la communication. L'utilisation des indicateurs visuels clairs, pour signaler les actions et les intentions des VAI, aide à réduire le stress et les incertitudes (ISO 9241-302 (2008)). Troisièmement, concevoir une interface utilisateur conviviale qui intègre des fonctionnalités de communication permet aux opérateurs de rester connectés avec leurs collègues et les superviseurs. Cela peut inclure des systèmes de messagerie instantanée ou des alertes en cas de besoin de communication (ISO 9241-210 (2019c)).

Afin de s'assurer que tout est dans l'ordre, il est important de vérifier que les VAI sont conformes aux normes de sécurité et aux réglementations en vigueur avant son intégration dans l'environnement de travail. Il faut vérifier que les véhicules répondent à toutes les exigences de conception et de sécurité pour prévenir les dangers (ISO 10218-1 (2011b)).

4.3.10 Sécurité informatique

Les mesures de prévention de cette partie se concentrent sur les dangers technologiques en lien avec les VAI. D'abord, on peut concevoir les systèmes informatiques des VAI en intégrant des mécanismes de protection contre les virus et les cyberattaques (ISO/IEC 27002 (2022)). Intégrer des mécanismes de sécurité des communications aide dans la protection des échanges de données entre les VAI et les systèmes de contrôle (ISO/IEC 27033-1 (2015)). Il reste également important de mettre en œuvre des politiques de sécurité informatique claires. Cela doit être établi lors de l'utilisation des VAI, en mettant l'accent sur la prévention des cyberattaques (NIST SP 800-39 (2011)).

Puis, la protection des données doit se baser sur les systèmes informatiques des VAI. Ces systèmes doivent être conçus avec des mécanismes robustes de protection des données sensibles. Cela inclut également la protection de chiffrement des données et l'accès restreint aux informations critiques (ISO/IEC 27002 (2022)). L'intégration des mécanismes d'authentification forte empêche l'accès non autorisé aux données sensibles stockées dans les VAI (ISO/IEC 27002 (2022)). La mise en place des mesures de sécurité des communications protège les données sensibles pendant les transferts entre les VAI et les systèmes de gestion (ISO/IEC 27033-1 (2015)). L'accès aux données sensibles stockées dans les VAI peut être limité avec la mise en œuvre des contrôles d'accès stricts (NIST SP800-53 (2020)).

Ensuite, les systèmes de communication des VAI doivent être conçus avec une redondance du réseau de sorte qu'ils puissent basculer automatiquement sur un réseau de secours en cas d'arrêt ou de mauvais fonctionnement du Wi-Fi (IEC 61508-2 (2010)). La mise en place des mécanismes de surveillance du réseau aide à détecter rapidement tout arrêt ou mauvais fonctionnement du Wi-Fi. Ces mécanismes de surveillance peuvent prendre des mesures correctives immédiates (ISO/IEC 18028-1 (2006)). Aussi, l'élaboration d'un plan de secours détaillé en cas de déconnexion du système de contrôle des VAI, garantit la sécurité des travailleurs et des opérations (ISO 22301 (2019e)).

Enfin, la conception des VAI avec des protocoles de communication standardisés facilite leur intégration dans des systèmes de contrôle des VAI commun à une entreprise (ISO 21813-1 (2021d)). Il faudra également s'assurer que les VAI peuvent s'intégrer de manière harmonieuse avec le système de contrôle déjà existant dans une entreprise et cela en tenant compte des protocoles et des interfaces de communication (ISO 21217 (2020c)). Pour les entreprises, il faut s'assurer également que les fournisseurs des VAI sont certifiés et suivent les bonnes normes. Le but est de garantir la compatibilité et la sécurité des systèmes intégrés (ISO/IEC 17065 (2012)).

4.3.11 Règles d'utilisation et de circulation

Cette partie se base sur la phase d'utilisation des VAI. Premièrement, établir des règles strictes concernant l'utilisation sécuritaire des VAI réduit les risques physiques, en mettant l'accent sur l'importance de rester vigilant et de surveiller les zones aveugles en tout temps (NIOSH (2001)). Deuxièmement, établir des règles claires de circulation pour les VAI et les travailleurs pour gérer les risques de collisions. Il faut assurer une communication efficace entre les opérateurs de VAI et les autres travailleurs afin de coordonner leurs déplacements et d'éviter les conflits (ISO 3691-4 (2023b)).

4.3.12 Stratégie de maintenance pour la sécurité des VAI

Assurer des maintenances régulières lors de l'utilisation des VAI permet de garder les VAI en bon état. Le but est d'identifier et de corriger tout défaut de conception qui pourrait survenir. On peut effectuer des suivis continus pour s'assurer que les VAI sont toujours conformes aux normes de sécurité et de conception (ISO 10218-2 (2011c)). Pour garantir une adhérence optimale, il est nécessaire de s'assurer que les VAI sont régulièrement entretenus. Cela peut être fait en vérifiant et en remplaçant les pneus et les systèmes de traction (ISO 18000-3 (2010)). Il est possible également de mettre en place un programme de maintenance régulier pour l'éclairage. Les lampes défectueuses ou en fin de vie doivent être remplacées rapidement. Ce qui garantit une visibilité continue (ANSI/IESNA RP-3-13 (2013)).

La mise en place des programmes de maintenance préventive peut s'avérer cruciale lors de l'utilisation des VAI, en fonction des contextes d'usage et des exigences spécifiques de chaque système. D'abord, la maintenance préventive pour les dispositifs de fixation assure qu'ils sont régulièrement entretenus et remplacés en cas d'usure ou de dégradation (NIOSH (2001)). Puis, la mise en œuvre d'un programme de maintenance préventive permet de vérifier que les systèmes de détection et d'évitement d'obstacles des VAI fonctionnent correctement et de manière fiable. Ensuite, la maintenance préventive intégrée aide à minimiser les risques de perte de contrôle due à des défaillances techniques (ISO 55001 (2014a)).

Enfin, on peut établir un plan de maintenance préventive. Le but est de vérifier régulièrement l'état des composants électroniques et des connecteurs, surtout après des périodes de fortes vibrations. Ce qui permet également de détecter les problèmes potentiels avant qu'ils ne deviennent critiques (ISO 18436-1 (2021a)).

4.3.13 Prévention des risques psychosociaux et mentaux liés aux VAI

Pour la phase de conception des VAI, on prévoit les systèmes VAI à automatiser autant de tâches que possible. Cela réduit la charge physique sur les travailleurs. Les mécanismes de chargement et déchargement remplacent les mouvements manuels répétitifs (ISO 3691-4 (2023b)). Pour les travaux bureautiques, placer les écrans et les interfaces utilisateurs à une hauteur et un angle optimal. Le but est d'éviter la contrainte excessive du cou et des épaules. L'utilisation des écrans antireflet réduit la fatigue oculaire (ISO 9241-5 (1998)). Aussi, concevoir une interface utilisateur conviviale et intuitive pour les opérateurs de façon à présenter des informations claires et faciles à comprendre. Cela va aider à éviter la confusion et la surcharge cognitive (ISO 9241-110 (2020b)). Il est important également de planifier des tâches réalisables et réalistes aux travailleurs, ce qui évitera de surcharger les travailleurs et d'équilibrer les horaires de travail. Le but est de réduire le stress et la pression liés aux délais serrés (ISO 10075 (2004)).

En ce qui concerne la phase d'intégration des VAI, utiliser des dispositifs de levage pour les VAI facilite le mouvement de charge, ce qui réduit les mouvements répétitifs excessifs. Pour cela, il faut s'assurer que les charges sont réparties de manière équilibrée (ISO 3691-4 (2023b)). Établir des directives sur les périodes de travail ininterrompues et les pauses recommandées permettent aux opérateurs de se lever, s'étirer et de reposer leurs muscles. Il faut donc encourager les pauses régulières dans le but de réduire les risques liés à la position assise prolongée (ISO 11226 (2000)). Encourager également une culture d'entraide et de soutien entre les travailleurs est essentiel. On peut établir des canaux de communication ouverts. Le but est de permettre aux travailleurs de partager leurs préoccupations et de recevoir du soutien (ISO 10075 (2004)). Pour réduire le sentiment d'isolement, on peut planifier les opérations de manière à garder le contact entre les opérateurs des VAI et les autres travailleurs et superviseurs (ISO 22320 (2018e)).

Pour gérer la frustration et la surcharge mentale des travailleurs, ces derniers doivent savoir où obtenir de l'aide en cas de besoin. Il est donc essentiel de fournir un soutien technique disponible en cas de problèmes ou de questions concernant les fonctionnalités du VAI (ISO/IEC 25000 (2014)).

Pour la phase d'utilisation des VAI, l'organisation de travail pour permettre la rotation des tâches entre les travailleurs est importante. Cela réduit la sollicitation constante des mêmes groupes musculaires et atténue les effets des mouvements répétitifs (ISO 6385 (2016a)). Il est important également d'encourager les opérateurs à changer de posture pendant les pauses. Les opérateurs peuvent utiliser des positions semi-assises ou debout. Cela aide à réduire la pression sur la colonne vertébrale et à stimuler la circulation sanguine (ISO 11226 (2000)). Permettre aux travailleurs d'alterner entre différentes tâches évite la monotonie et le sentiment de lassitude. On peut proposer des activités variées pour maintenir l'engagement et la motivation (ISO 27500 (2016c)). Aussi, la mise en place des programmes d'assistance psychosociale aide les travailleurs à gérer le stress, l'anxiété et d'autres problèmes de santé mentale. Ces programmes peuvent être comme des collaborations avec des professionnels de la santé mentale qui offrent des séances d'accompagnement en cas de besoin (ISO 45001 (2018b)). Enfin, établir un programme de suivi régulier pour les travailleurs leur permet de discuter de leur expérience et partager leurs préoccupations. Cela peut inclure des séances de débriefing après les opérations (ISO 22320 (2018e)).

4.4 Portrait de solutions de prévention des dangers en lien avec les VAI

Dans la recherche dédiée à la sécurité des VAI dans les environnements de travail, le portrait des solutions vise à présenter de manière synthétique l'ensemble des mesures préventives identifiées. Le Tableau 4.4 présente le portrait de solutions de prévention des dangers en lien avec les VAI.

Tableau 4.4 : Portrait de solutions de prévention des dangers en lien avec les VAI

| Catégories | Dangers | Sources | Phases | | | | | |
|------------|--|-------------------------|---|-------------------|---|--------------------------|--|--------------------------|
| | | | Conception | Références | Intégration | Références | Utilisation | Références |
| Physiques | Chute du travailleur après contact avec un AGV de petites dimensions | Inattentions humaines | Utilisation de systèmes de détection des obstacles | ISO 12100 (2010) | Formation et sensibilisation des opérateurs | NIOSH (2001) | Surveillance continue | NIOSH (2001) |
| | | | Développement d'interfaces personne-machine intuitives | ISO 13482 (2014c) | Limitation d'accès aux zones de travail dangereuses | CSA Z432-16 (2021) | Communication et signalisation | ANSI/ITSDF B56.5 (2019) |
| | | Zones aveugles | Utilisation de systèmes de détection des zones aveugles | ISO 12100 (2010) | Formation et sensibilisation des opérateurs | NIOSH (2001) | Communication et coordination | ANSI/ITSDF B56.5 (2019) |
| | | | | | Signalisation et marquage des zones aveugles | ANSI/ITSD F B56.5 (2019) | Règles d'utilisation sécuritaire des VAI | NIOSH (2001) |
| | | VAI évitant un obstacle | Systèmes de détection améliorés | ISO 12100 (2010) | Formation des opérateurs | NIOSH (2001) | Surveillance continue | ANSI/ITSDF B56.5 (2019) |
| | | | | | Vitesse de déplacement adaptative | ISO 10218-1 (2011b) | Zones de travail délimitées | ANSI/ITSD F B56.5 (2019) |

| Catégories | Dangers | Sources | Phases | | | | | |
|------------|-----------|-------------------------------------|--|----------------------|--|--------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| | | | Conception | Références | Intégration | Références | Utilisation | Références |
| Physiques | Collision | Inattentions humaines | Assistance à la prise de décision | ISO 9241-210 (2019c) | Formation des opérateurs | NIOSH (2001) | Règles de circulation et priorités | ISO 3691-4 (2023b) |
| | | | | | | | Surveillance continue | ANSI/ITSDF B56.5 (2019) |
| | | Zones aveugles | Systèmes de détection des zones aveugles | ISO 12100 (2010) | Formation des opérateurs | NIOSH (2001) | Communication et coordination | ANSI/ITSDF B56.5 (2019) |
| | | | Caméras supplémentaires | ISO 5006 (2017b) | Signalisation et marquage des zones aveugles | ANSI/ITSD F B56.5 (2019) | Utilisation d'aides à la conduite | ISO 3691-4 (2023b) |
| | | Défaut de conception | Évaluation des risques | ISO 12100 (2010) | Certification et conformité | ISO 16001-1 (2017a) | Maintenance et suivi | ISO 10218-2 (2011c) |
| | | | Tests de sécurité | ISO 16001-1 (2017a) | Formation des opérateurs | NIOSH (2001) | Surveillance de la sécurité | ISO 3691-4 (2023b) |
| | | VAI évitant un obstacle (autonomie) | Programmation des systèmes d'évitement d'obstacles | ISO 13482 (2014c) | Formation des opérateurs | NIOSH (2001) | Surveiller les évitements d'obstacles | ISO 3691-4 (2023b) |
| | | | Limitation de vitesse automatique | ISO 10218-1 (2011b) | Tests de performance | ISO 10218-2 (2011c) | Communication avec les travailleurs | ISO 12100 (2010) |

| Catégories | Dangers | Sources | Phases | | | | | |
|------------|----------------|--|---|---------------------|--|--------------------------|--|------------------------|
| | | | Conception | Références | Intégration | Références | Utilisation | Références |
| Physiques | Chute d'objets | Objet ou produit mal placé dans le rayonnage | Conception du VAI avec système de détection | ISO 10218-1 (2011b) | Formation des opérateurs | NIOSH (2001) | Maintien de l'ordre dans les rayonnages | RMI/ANSI MH16.1 (2012) |
| | | | Capacité de détection des rayonnages | ISO 3691-5 (2014b) | Vérification du rayonnage | RMI/ANSI MH16.1 (2012) | Inspection régulière des rayonnages | ISO 3691-4 (2023b) |
| | | Mauvaise fixation de l'objet ou du produit sur l'AGV | Conception de dispositifs de fixation sécurisés | ISO 3691-5 (2014b) | Formation des opérateurs | NIOSH (2001) | Inspections régulières de l'état des dispositifs de fixation | NIOSH (2001) |
| | | | Tests de résistance | ISO 12100 (2010) | Vérification des fixations | NIOSH (2001) | Maintenance préventive | NIOSH (2001) |
| | | Arrêt brusque d'un AGV portant le produit | Systèmes d'arrêt progressif | ISO 12100 (2010) | Formation des opérateurs | NIOSH (2001) | Zone d'évitement des piétons | NIOSH (2001) |
| | | | Systèmes de détection d'obstacles | ISO 10218-1 (2011b) | Vérification des systèmes de détection | ANSI/ITSD F B56.5 (2019) | Surveillance des arrêts d'urgence | NIOSH (2001) |

| Catégories | Dangers | Sources | Phases | | | | | |
|------------|---------------------------------|--|--|---------------------|------------------------------------|--------------------|--|--|
| | | | Conception | Références | Intégration | Références | Utilisation | Références |
| Physiques | Chute d'objets | Collision du VAI avec un travailleur | Conception ergonomique | ISO 6385 (2016a) | Formation des opérateurs | NIOSH (2001) | Utilisation de dispositifs d'avertissement | ISO 12100 (2010) |
| | | | | | Utilisation de systèmes de guidage | ISO 12100 (2010) | | Utilisation de dispositifs d'arrêt d'urgence |
| | | Collision entre deux ou plusieurs VAI | Conception de pare-chocs | ISO 26262-1 (2018c) | Formation des opérateurs | ISO 45001 (2018 b) | Utilisation de dispositifs d'arrêt d'urgence | ISO 12100 (2010) |
| | | | | | Utilisation de systèmes de guidage | ISO 12100 (2010) | | |
| | Liés à la manutention mécanique | Un travailleur se trouve entre deux chariots liés à un AGV de remorquage en mouvements | Utilisation de dispositifs de sécurité | ISO 3691-4 (2023b) | Formation des opérateurs | NIOSH (2001) | Surveillance continue | ANSI/ITSDF B56.5 (2019) |
| | | | | | Marquages de sécurité | ISO 3864-2 (2016b) | Communication entre travailleurs et AGV | ISO 12100 (2010) |

| Catégories | Dangers | Sources | Phases | | | | | |
|------------|---------------------------------|--|--|--|--------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| | | | Conception | Références | Intégration | Références | Utilisation | Références |
| Physiques | Liés à la manutention mécanique | Incapacité de détecter la présence du travailleur par l'AGV derrière ou entre les chariots | Conception ergonomique | ISO 12100 (2010) | Formation des opérateurs | NIOSH (2001) | Surveillance continue | ANSI/ITSDF B56.5 (2019) |
| | | | Utilisation de technologies de communication | ISO 17757 (2019a) | Marquages de sécurité | ISO 3864-2 (2016b) | Formation des travailleurs | NIOSH (2001) |
| | | Un VAI de remorquage évitant un obstacle | Étude des trajectoires | NIOSH (2001) | Formation des opérateurs | ISO 3691-4 (2023b) | Surveillance continue | ISO 3691-4 (2023b) |
| | Marquages de sécurité | | | | ISO 3864-2 (2016b) | Maintenance préventive | NIOSH (2001) | |
| | Liés aux rayonnements | Se trouver au même milieu qu'un VAI de désinfection UV lors de son utilisation | Limitation des rayonnements | IEC 60335-2-109 (2016) IEC 62471 (2006) | Formation des opérateurs | OSHA 29 CFR 1910.1053 (2018) | Évaluation des risques | ISO 45001 (2018 b) |
| | | | | | Marquages de sécurité | ISO 3864-2 (2016b) | Contrôles administratifs | NIOSH (2001) |

| Catégories | Dangers | Sources | Phases | | | | | |
|----------------|------------------------|---|---|------------------------|--|------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| | | | Conception | Références | Intégration | Références | Utilisation | Références |
| Technologiques | Cyberattaques | Introduction de virus informatique | Conception sécurisée des systèmes informatiques | ISO/IEC 27002 (2022) | Tests de sécurité | NIST SP 800-115 (2021) | Politiques de sécurité informatique | NIST SP 800-39 (2011) |
| | | | Sécurité des communications | ISO/IEC 27033-1 (2015) | Formation des responsables informatiques | ISO/IEC 27032 (2023a) | Sensibilisation des travailleurs | NIST SP 800-50 (2003) |
| | | Piratage de données sensibles | Protection des données | ISO/IEC 27002 (2022) | Sécurité des communications | ISO/IEC 27033-1 (2015) | Politiques de sécurité des données | NIST SP 800-39 (2011) |
| | | | Authentification forte | ISO/IEC 27002 (2022) | Contrôle d'accès | NIST SP800-53 (2020) | Formation des utilisateurs | NIST SP 800-50 (2003) |
| | Système AGV déconnecté | Arrêt ou mauvais fonctionnement de wifi | Redondance du réseau | IEC 61508-2 (2010) | Surveillance du réseau | ISO/IEC 18028-1 (2006) | Formation des opérateurs | ISO/IEC 27032 (2023a) |
| | | | Tests de résistance | IEEE Std 802.11 (2016) | Tests d'intégration | ISO/IEC 30141 (2018) | Plan de secours | ISO 22301 (2019e) |

| Catégories | Dangers | Sources | Phases | | | | | | |
|------------------|---------------------------|---|---|---------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------|
| | | | Conception | Références | Intégration | Références | Utilisation | Références | |
| Technologiques | Perte de contrôle des AGV | Intégration d'un ou de plusieurs AGV soumis à un système AGV différent de celui de l'entreprise | Standardisation des protocoles de communication | ISO 21813-1 (2021d) | Tests d'interopérabilité | ISO 21217 (2020c) | Formation des opérateurs | ISO 22301 (2019e) | |
| | | | Compatibilité des systèmes | ISO 21217 (2020c) | Certification des fournisseurs | ISO/IEC 17065 (2012) | | Maintenance préventive | ISO 55001 (2014a) |
| Environnementaux | Difficulté de circulation | Surfaces lisses ou glissantes | Sélection des matériaux | ISO 5006 (2017b) | Tests de performance | ISO 7096 : (2020a) | Maintenance régulière des VAI | ISO 18000-3 (2010) | |
| | | | Capteurs d'adhérence | ISO 15622 (2018a) | Évaluation des environnements | ISO 22867 (2021c) | | | |
| | | Surfaces dégradées | Systèmes de suspension adaptés | ISO 13482 (2014c) | Capteurs de détection des obstacles | ISO 10218-1 (2011b) | ISO 15622 (2018a) | Surveillance en temps réel | ISO 19649 (2017 d) |
| | | | | | Contrôle de la vitesse adaptatif | | | | |

| Catégories | Dangers | Sources | Phases | | | | | |
|------------------|-------------------------------------|---|------------------------------------|--------------------|------------------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| | | | Conception | Références | Intégration | Références | Utilisation | Références |
| Environnementaux | Difficulté de circulation | Vent fort pour les AGV externes | Conception aérodynamique | ISO 6469-1 (2019b) | Surveillance météorologique | ISO 15622 (2018a) | Alerte aux opérateurs | ISO 15622 (2018a) |
| | | | | | Programmation adaptative | ISO 15622 (2018a) | Limitation de la vitesse | ISO 19649 (2017 d) |
| | | Vibrations au niveau des connecteurs et dispositifs électroniques | Conception robuste des connecteurs | ISO 6469-3 (2021b) | Tests de résistance aux vibrations | ISO 16750-3 (2007) | Surveillance en temps réel | ISO 19649 (2017 d) |
| | | | Montage antivibratoire | ISO 7096 : (2020a) | Isolation des composants | ISO 16750-4 (2023e) | Maintenance préventive | ISO 18436-1 (2021a) |
| | Collision de l'AGV avec un obstacle | Obstacle se trouve en un niveau de surface plus bas | Conception d'obstacle détectable | ISO 15622 (2018a) | Tests de calibrage des capteurs | ISO 15622 (2018a) | Alerte aux opérateurs | ISO 19649 (2017 d) |
| | | | | | Cartographie précise | ISO 19091 (2019d) | | |

| Catégories | Dangers | Sources | Phases | | | | | |
|------------------|--|-----------------------------------|---|-------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| | | | Conception | Références | Intégration | Références | Utilisation | Références |
| Environnementaux | Chargement électrostatique | Sol isolé | Conception de systèmes de mise à la terre | ANSI/ESD S20.20 (2014) | Mise à la terre adéquate | ANSI/ESD S6.1 (2019) | Utilisation de systèmes de détection | IEC 61340-5-1 (2016) |
| | | | Choix de matériaux appropriés | ANSI/ESD STM97.1 (2015) | | | Contrôle de l'environnement | IEC 60079-32-1 (2017) |
| | Perte de vision pour les AGV | Flux lumineux insuffisant | Conception d'éclairage adéquat | ISO 23601 (2020d) | Tests d'éclairage | ANSI/IES RP-8-18 (2018) | Maintenance régulière | ANSI/IESN A RP-3-13 (2013) |
| | | | Réflecteurs et surfaces réfléchissantes | ANSI/ISEA 107 (2020) | | | Signallement visuel | ISO 3864-1 (2011a) |
| | Présence d'une forte pluie ou mouvement de poussière | Conception de systèmes d'essuyage | ISO 2575 (2021f) | Tests de résistance aux intempéries | ISO 20653 (2023c) | Activation de modes adaptés | ISO 26262-1 (2018c) | |
| | | | Utilisation de matériaux hydrophobes | (Pao, 2019) | Positionnement optimal | ISO 16750-2 (2023d) | Surveillance continue | ISO 26262-11 (2018d) |
| Ergonomiques | Liés à la charge physique de travail | Mouvements répétitifs | Automatisation des tâches | ISO 6385 (2016a) | Réduction des charges | ISO 3691-4 (2023b) | Formation et sensibilisation | ISO 11226 (2000) |
| | | | | | | | Rotation des tâches | ISO 11226 (2000) |

| Catégories | Dangers | Sources | Phases | | | | | |
|-----------------------------|--------------------------------|--|---|-------------------------|--|--------------------------|--|--------------------------|
| | | | Conception | Références | Intégration | Références | Utilisation | Références |
| Ergonomiques | Liés au travail bureautique | Position assise d'une longue durée | Écrans ergonomiques | ISO 9241-5 (1998) | Temps de travail et pauses | ISO 11226 (2000) | Alternance des postures | ISO 11226 (2000) |
| | | | | | | | Formation sur l'ergonomie | ISO 6385 (2016a) |
| Psychosociaux et mentaux | Psychosociaux | Peur de perdre le travail | Planification des tâches | ISO 10075 (2004) | Formation à la santé mentale | ISO 45001 (2018 b) | Roulement des tâches | ISO 27500 (2016 c) |
| | | | | | Soutien social | ISO 10075 (2004) | Programmes d'aide aux employés | ISO 45001 (2018 b) |
| | | Manque de formation | Conception des interfaces utilisateur | ISO 9241-210 (2019c) | Formation initiale complète | ISO 12100 (2010) | Programmes de soutien psychosocial | ISO 10075-3 (2004) |
| | | | | | Sensibilisation à la gestion du stress | ISO 10075- 1 (2017c) | Communication ouverte | ISO 45001 (2018 b) |
| | | Collaboration avec les AGV | Conception des interactions | ISO 9241- 302 (2008) | Formation à la collaboration | ISO 22320 (2018e) | Communication proactive | ISO 45001 (2018b) |
| | | | | | Systèmes de communication | ISO 9241- 302 (2008) | Formation continue | ISO 22320 (2018e) |

| Catégories | Dangers | Sources | Phases | | | | | |
|--------------------------|-------------------|--|---------------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| | | | Conception | Références | Intégration | Références | Utilisation | Références |
| Psychosociaux et mentaux | Psychosociaux | Travail solitaire et isolement | Conception de l'interface utilisateur | ISO 9241-210 (2019c) | Formation à la communication | ISO 22320 (2018e) | Communication régulière | ISO 22320 (2018e) |
| | | | | | Planification des équipes | ISO 22320 (2018e) | Programme de Suivi | ISO 22320 (2018e) |
| | Surcharge mentale | Difficulté de collaboration avec les AGV | Interface utilisateur intuitive | ISO 9241-110 (2020b) | Soutien technique | ISO/IEC 25000 (2014) | Instructions claires | ISO 9241-110 (2020b) |
| | | | | | | | Système d'alerte | ISO 3691-4 (2023b) |

Le tableau 4.4 représente un résumé des mesures de préventions des dangers liés aux VAI. Ces mesures sont importantes afin de minimiser les dangers à partir de la conception du VAI. Ce tableau se veut un outil de référence pour les praticiens de l'industrie, les responsables de la SST, les fabricants et ceux concernés par la sécurité dans les environnements de travail utilisant les VAI. La structure du tableau vise à rendre le portrait informatif, accessible et facilement applicable par les fabricants et les entreprises utilisatrices de VAI. La structure offre une vue complète des dangers et des solutions pertinentes afin d'assurer une utilisation sûre et sécurisée des VAI.

La démarche de prévention développée dans cette étude vise à avoir un impact concret et immédiat dans l'industrie des VAI. Elle peut être appliquée de plusieurs manières. D'abord, les fabricants de véhicules peuvent utiliser cette démarche de prévention comme un guide pour concevoir des VAI plus sûrs dès la conception. Ils auront un aperçu complet des dangers liés aux VAI avec leurs solutions de prévention à envisager. Ensuite, les entreprises utilisatrices des véhicules peuvent utiliser cette démarche pour former leurs employés, les sensibiliser aux risques et gérer l'environnement de travail comme limiter l'accès à certaines zones dangereuses. Les entreprises pourront également réaliser des audits de sécurité basés sur cette démarche, ce qui permet d'identifier des lacunes et de mettre en place des actions correctives. Enfin, cette démarche peut servir de base à une amélioration continue de la sécurité des VAI. Les entreprises peuvent réévaluer régulièrement leurs opérations avec de nouvelles formations ainsi qu'avec de nouvelles solutions de prévention.

La consultation de cet outil permet une compréhension plus approfondie des solutions de prévention des dangers en lien avec les VAI, ce qui garantit des pratiques plus sûres et une réduction des risques. En plus, il met en évidence la diversité des mesures de prévention qui couvrent un large éventail de dangers liés aux VAI. La répartition de ces solutions est mise sur les trois phases, de la conception jusqu'à l'utilisation des VAI. Cette répartition met en évidence l'importance de considérer la sécurité à chaque phase.

4.5 Limites et travaux futurs

Cette recherche présente plusieurs limites. D'abord, le questionnaire élaboré pour les experts en SST doit être testé sur le terrain. Bien qu'il ait été conçu avec soin afin d'identifier les dangers liés aux VAI dans l'environnement de travail, sa validité et son efficacité dans la collecte de données réelles restent à confirmer par une mise en œuvre pratique.

Ensuite, la simulation réalisée pour évaluer la réaction du VAI dans diverses situations dangereuses a été contrainte par des limitations inhérentes aux conditions de laboratoire et aux possibilités offertes sur le terrain. À cause de ces contraintes, seulement un ensemble limité de scénarios a pu être examiné. Des situations potentiellement plus dangereuses n'ont pas pu être explorées dans le cadre de cette étude. Par ailleurs, les conditions spécifiques du terrain n'ont pas permis une exploration exhaustive de tous les risques possibles. Par conséquent, bien que l'étude fournisse des aperçus précieux, ses conclusions pourraient ne pas englober la totalité des dangers possiblement associés aux VAI.

De plus, le portrait des solutions de prévention des dangers liés aux VAI repose principalement sur la recherche théorique. Il a été réalisé en se basant sur diverses normes, lois et principes généraux de sécurité industrielle et de gestion de la sécurité au travail. Ces bases théoriques sont solides, mais elles peuvent ne pas refléter complètement les réalités opérationnelles spécifiques au Québec.

Enfin, il est essentiel de noter que cette recherche se trouve dans un contexte anticipatif pour le Québec, où les VAI ne sont pas encore largement déployés. Par conséquent, les résultats et les recommandations de cette recherche sont davantage orientés vers une préparation aux défis futurs que vers la résolution des problèmes actuels.

Concernant les travaux futurs, il sera important de tester le questionnaire sur le terrain afin de valider son efficacité et de collecter des données plus substantielles. La simulation des réactions des VAI face aux dangers pourrait être étendue pour inclure un éventail plus large de scénarios. Cela va permettre d'approfondir davantage les limites et les performances de ces véhicules. Aussi, des études de cas pratiques pourraient être entreprises pour compléter et adapter les recommandations de prévention des dangers liés

aux VAI. Enfin, le suivi continu de l'évolution des dangers et des bonnes pratiques en matière de SST liés aux VAI est essentiel à mesure que ces véhicules deviennent de plus en plus répandus dans la région. Cette recherche pourrait être mise à jour périodiquement pour refléter ces développements.

CONCLUSION

Ce projet de recherche avait pour objectif d'élaborer un outil de prévention des dangers en lien avec les VAI dans le contexte manufacturier. La revue de littérature a permis d'identifier les différents dangers en lien avec les véhicules, qu'il s'agisse de collision, de risque de chutes d'objets ou de problèmes psychosociaux et mentaux. Par la suite, différentes étapes ont été appliquées. Ces dangers ont été étudiés et analysés sous différentes étapes.

Des simulations ont permis de vérifier et de valider la sécurité d'un VAI face à quelques dangers. Puis, la création d'un questionnaire spécifique pour les experts en SST, qui s'intéressent aux VAI, ouvre la voie à des études futures visant à collecter des données empiriques sur les risques qui existent dans l'environnement de travail impliquant les VAI. Cette approche permettra de valider ainsi que d'enrichir les résultats obtenus dans le cadre de cette recherche théorique.

Cependant, la recherche comporte des limites, notamment la réalisation de simulations plus complexes en condition réelles pour explorer des scénarios de dangers plus variés. De plus, l'adoption limitée des VAI au Québec a restreint la disponibilité de données empiriques. Malgré cela, cette recherche pose des bases solides pour des études futures visant à mieux comprendre et à prévenir les dangers liés aux VAI.

Cette recherche offre un aperçu détaillé des risques associés aux VAI dans le contexte de la SST. Elle fournit également un outil précieux pour les fabricants des VAI, les entreprises et les experts en SST pour améliorer l'utilisation de ces véhicules en toute sécurité. La recherche souligne l'importance de considérer la sécurité à chaque phase d'un VAI, de sa conception à son utilisation. Elle encourage finalement des études ultérieures pour renforcer la compréhension des dangers et des solutions de prévention dans des domaines en constante évolution.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adem, A., Çakit, E., & Dağdeviren, M. (2020). Occupational health and safety risk assessment in the domain of Industry 4.0. *SN Applied Sciences*, 2(5). doi:10.1007/s42452-020-2817-x
- American National Standards Institute (ANSI). (2012). Specification For The Design, Testing And Utilization Of Industrial Steel Storage Racks (MH16.1).
- American National Standards Institute (ANSI). (2015). ESD Association Standard Test Method For The Protection Of Electrostatic Discharge Susceptible Items - Floor Materials And Footwear - Resistance Measurement In Combination With A Person (ESD STM97.1).
- American National Standards Institute (ANSI). (2019). Electrostatic Discharge Grounding (ESD S6.1).
- American National Standards Institute (ANSI). (2020). Safety Standard for Low, High Lift Trucks (B56.1).
- American National Standards Institute (ANSI), E. D. A. E. (2014). Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies and Equipment (Excluding Electrically Initiated Explosive Devices) (S20. 20).
- American National Standards Institute (ANSI), I. E. S. I. (2013). American National Standard Practice on Lighting for Educational Facilities (RP-3-13).
- American National Standards Institute (ANSI), I. E. S. I. (2018). Practice for Design and Maintenance of Roadway and Parking Facility Lighting (RP-8-18).
- American National Standards Institute (ANSI), I. T. S. D. F. I. (2019). Safety Standard For Guided Industrial Vehicles (B56.5). In.
- American National Standards Institute (ANSI), I. I. S. E. A. I. (2020). High-Visibility Safety Apparel (107). In.
- American National Standards Institute (ANSI), R. I. A. R. (2020). Industrial Mobile Robots - Safety Requirements - Part 1: Requirements For The Industrial Mobile Robot (R15.08-1).
- Archila, J. F., & Becker, M. (2013). *Mathematical models and design of an AGV (Automated Guided Vehicle)*. Paper presented at the Proceedings of the 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2013.
- Asljung, D., Nilsson, J., & Fredriksson, J. (2017). Using Extreme Value Theory for Vehicle Level Safety Validation and Implications for Autonomous Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2(4), 288-297. doi:10.1109/TIV.2017.2768219
- Bačík, J., Tkáč, P., Hric, L., Alexovič, S., Kyslan, K., Olexa, R., & Perduková, D. (2020). Phollower—the universal autonomous mobile robot for industry and civil environments with COVID-19 germicide add-on meeting safety requirements. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(21), 1-16. doi:10.3390/app10217682
- Badri, A., Gbodossou, A., & Nadeau, S. (2012). Occupational health and safety risks: Towards the integration into project management. *Safety Science*, 50(2), 190-198. doi:10.1016/j.ssci.2011.08.008

- Badri, A., Souissi, A. S., & Boudreau-Trudel, B. (2018). Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? *Safety Science*, *109*, 403-411. doi:10.1016/j.ssci.2018.06.012
- Beetz, M., Bartels, G., Albu-Schaffer, A., Balint-Benczedi, F., Belder, R., Bebler, D., . . . Worch, J. H. (2015). *Robotic agents capable of natural and safe physical interaction with human co-workers*. Paper presented at the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems.
- Bell, J., MacDonald, B. A., Ahn, H. S., & Scarfe, A. J. (2016). An Analysis of Automated Guided Vehicle Standards to Inform the Development of Mobile Orchard Robots. *IFAC-PapersOnLine*, *49*(16), 475-480. doi:10.1016/j.ifacol.2016.10.086
- Blanchet, M. (2016). Industrie 4.0 Nouvelle donne industrielle, nouveau modèle économique. *Outre-Terre*, *46*(1), 62-85. doi:10.3917/oute1.046.0062
- Bluff, E. (2003). *Systematic management of occupational health and safety [electronic resource] / Liz. Bluff*. Canberra: National Research Centre for Occupational Health and Safety Regulation.
- Bocewicz, G., Nielsen, I., & Banaszak, Z. (2014). Automated guided vehicles fleet match-up scheduling with production flow constraints. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *30*, 49-62. doi:10.1016/j.engappai.2014.02.003
- Bouliane, P., Beaugrand, S., Vigneault, S., & Richard, J. (2011). À chacun sa voie. Chariots élévateurs et piétons.
- British Standard Institute. (2007). Système de management de la santé et de la sécurité au travail — exigences (OHSAS 18001). *Royaume-Uni: British Standard Institute*.
- Canada, G. d. (2017). Qu'est-ce que le rayonnement ultraviolet? Retrieved from <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/securite-soleil/qu-est-que-rayonnement-ultraviolet.html>
- Canadian Standards Association (CSA). (2021). Safeguarding of machinery (Z432-16). In.
- Cardarelli, E., Sabbatini, L., Secchi, C., & Fantuzzi, C. (2015). *Cloud robotics paradigm for enhanced navigation of autonomous vehicles in real world industrial applications*. Paper presented at the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems.
- CCHST. (2016). Rayonnement ultraviolet. Retrieved from https://www.cchst.ca/oshanswers/phys_agents/ultravioletradiation.html
- Centre Canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST). (2016). Travail en position assise - Aperçu. Retrieved from https://www.cchst.ca/oshanswers/ergonomics/sitting/sitting_overview.html
- Centre Canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST). (2018). Stress en milieu de travail - Généralités. Retrieved from <https://www.cchst.ca/oshanswers/psychosocial/stress.html>
- Chapman, R. J. (2012). *Simple Tools and Techniques for Enterprise Risk Management*.
- Chinniah, Y., & Champoux, M. (2008). La sécurité des machines automatisées. Analyse des risques et des moyens de protection sur une presse à injection de plastique.
- Chowdhury, A., Karmakar, G., Kamruzzaman, J., Jolfaei, A., & Das, R. (2020). Attacks on self-driving cars and their countermeasures: A survey. *IEEE Access*, *8*, 207308-207342. doi:10.1109/ACCESS.2020.3037705

- Chung, W., Kim, S., Choi, M., Choi, J., Kim, H., Moon, C. B., & Song, J. B. (2009). Safe navigation of a mobile robot considering visibility of environment. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(10), 3941-3950. doi:10.1109/TIE.2009.2025293
- Coito, T., Viegas, J. L., Martins, M. S. E., Cunha, M. M., Figueiredo, J., Vieira, S. M., & Sousa, J. M. C. (2019). A novel framework for intelligent automation. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1825-1830. doi:10.1016/j.ifacol.2019.11.501
- Commission de la santé et sécurité du travail (CSST). (2011). Prévention au travail Faire tomber les risques de chutes de hauteur.
- Commission des normes de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST). (2017). Prévention au travail Jeunes au travail Des initiatives qui portent fruit.
- Commission des normes de l'équité de la santé et sécurité du travail. (2016). Outils d'identification des risques. 9. Retrieved from <https://www.cnesst.gouv.qc.ca/sites/default/files/publications/outil-didentification-des-risques.pdf>
- Commission des normes de l'équité de la santé et sécurité du travail. (2016). Outils d'identification des risques. Retrieved from <https://www.cnesst.gouv.qc.ca/sites/default/files/publications/outil-didentification-des-risques.pdf>
- Correia, N., Teixeira, L., & Ramos, A. L. (2020). Implementing an AGV system to transport finished goods to the warehouse. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*, 5(2), 241-247. doi:10.25046/aj050231
- Cronin, C., Conway, A., & Walsh, J. (2019). *State-of-the-art review of autonomous intelligent vehicles (AIV) technologies for the automotive and manufacturing industry*. Paper presented at the 30th Irish Signals and Systems Conference, ISSC 2019.
- Danjou, C., Pellerin, R., & Rivest, L. (2017). *Le passage au numérique : Industrie 4.0 : des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité*.
- De Las Morenas, J., Da Silva, C. M., Funchal, G. S., Melo, V., Vallim, M., & Leitao, P. (2020). *Security experiences in IoT based applications for building and factory automation*. Paper presented at the Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology.
- Digmayer, C., & Jakobs, E. (2018, 22-25 July 2018). *Employee Empowerment in the Context of Domain-Specific Risks in Industry 4.0*. Paper presented at the 2018 IEEE International Professional Communication Conference (ProComm).
- Digmayer, C., & Jakobs, E. M. (2019). *Developing Safety Cultures for Industry 4.0. New Challenges for Professional Communication*. Paper presented at the IEEE International Professional Communication Conference.
- Endroyo, B., Yuwono, B. E., Mardapi, D., & Soenarto. (2015). *Model of learning/training of Occupational Safety & Health (OSH) based on industry in the construction industry*. Paper presented at the Procedia Engineering.
- Eren Şenaras, A. (2019). Chapter 8 - Parameter optimization using the surface response technique in automated guided vehicles. In K. Kumar, D. Zindani, & P. Davim (Eds.), *Sustainable Engineering Products and Manufacturing Technologies* (pp. 187-197): Academic Press.

- Erol, M. (2019). Occupational health and work safety systems in compliance with industry 4.0: Research directions. *International Journal of eBusiness and eGovernment Studies*, 11(2), 121-133. doi:10.34111/ijeveg.20191123
- Fazlollahtabar, H., & Saidi-Mehrabad, M. (2015). Risk for multiple AGV system. In *Studies in Systems, Decision and Control* (Vol. 20, pp. 189-203).
- Galati, F., & Bigliardi, B. (2019). Industry 4.0: Emerging themes and future research avenues using a text mining approach. *Computers in Industry*, 109, 100-113. doi:10.1016/j.compind.2019.04.018
- Gambatese, J. A. (2000). *Safety constructability: Designer involvement in construction site safety*. Paper presented at the Proceedings of Construction Congress VI: Building Together for a Better Tomorrow in an Increasingly Complex World.
- Gualtieri, L., Rauch, E., & Vidoni, R. (2021). Emerging research fields in safety and ergonomics in industrial collaborative robotics: A systematic literature review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67. doi:10.1016/j.rcim.2020.101998
- Häkkinen, K. (2015). Safety Management—From Basic Understanding Towards Excellence. In (pp. 7-15).
- Heinrich, H. W. (1931). *Industrial accident prevention; a scientific approach*: First edition. New York ; London : McGraw-Hill book company, inc., 1931.
- Hellmann, W., Marino, D., Megahed, M., Suggs, M., Borowski, J., & Negahban, A. (2019). Human, AGV or AIV? An integrated framework for material handling system selection with real-world application in an injection molding facility. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(1-4), 815-824. doi:10.1007/s00170-018-2958-x
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). *Design principles for industrie 4.0 scenarios*. Paper presented at the Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences.
- Hu, D., Ke, H., & Fu, W. (2017). *Research and design of control system based on NRF24101 for intellectualized vehicle*. Paper presented at the Proceedings of 2017 IEEE 6th Data Driven Control and Learning Systems Conference, DDCLS 2017.
- Huba, M., & Kozák, Š. (2016). *From e-Learning to Industry 4.0*. Paper presented at the ICETA 2016 - 14th IEEE International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications, Proceedings.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (2016). IEEE Standard for Information technology -Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks--Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (802.11).
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2006). Photobiological safety of lamps and lamp systems (62471).
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2010). Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 2: Requirements for electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems (61508-2).

- International Electrotechnical Commission (IEC). (2016). Household and similar electrical appliances - Safety - Part 2-109: Particular requirements for UV radiation water treatment appliances (60335-2-109).
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2016). Electrostatics - Part 5-1: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena - General requirements (61340-5-1). In.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2017). Explosive atmospheres - Part 32-1: Electrostatic hazards - guidance (TS 60079-32-1:2013+AMD1). In.
- International organization for Standardization (ISO). (1998). Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) — Part 5: Workstation layout and postural requirements (9241-5).
- International Organization for Standardization (ISO). (2000). Ergonomics — Evaluation of static working postures (11226).
- International Organization for Standardization (ISO). (2004). Ergonomic principles related to mental workload — Part 3: Principles and requirements concerning methods for measuring and assessing mental workload (10075-3).
- International organization for Standardization (ISO). (2007). Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 3: Mechanical loads (16750-3).
- International Organization for Standardization (ISO). (2008). Ergonomics of human-system interaction — Part 302: Terminology for electronic visual displays (9241-302). In.
- International Organization for Standardization (ISO). (2010). Safety of machinery — General principles for design — Risk assessment and risk reduction (12100). In.
- International Organization for Standardization (ISO). (2011a). Graphical symbols — Safety colours and safety signs — Part 1: Design principles for safety signs and safety markings (3864-1). In.
- International Organization for Standardization (ISO). (2011b). Robots and robotic devices — Safety requirements for industrial robots — Part 1: Robots (10218-1). In.
- International Organization for Standardization (ISO). (2011c). Robots and robotic devices — Safety requirements for industrial robots — Part 2: Robot systems and integration (10218-2).
- International organization for Standardization (ISO). (2014a). Asset management — Management systems — Requirements (55001).
- International Organization for Standardization (ISO). (2014b). Industrial trucks — Safety requirements and verification — Part 5: Pedestrian-propelled trucks (3691-5).
- International Organization for Standardization (ISO). (2014c). Robots and robotic devices — Safety requirements for personal care robots (13482). In.
- International Organization for Standardization (ISO). (2014d). Robots et composants robotiques — Exigences de sécurité pour les robots de soins personnels (13482).
- International Organization for Standardization (ISO). (2016a). Ergonomics principles in the design of work systems (6385).
- International Organization for Standardization (ISO). (2016b). Graphical symbols — Safety colours and safety signs — Part 2: Design principles for product safety labels (3864-2). In.

- International Organization for Standardization (ISO). (2016c). The human-centred organization — Rationale and general principles (27500).
- International Organization for Standardization (ISO). (2017a). Earth-moving machinery — Object detection systems and visibility aids — Performance requirements and tests (16001).
- International Organization for Standardization (ISO). (2017b). Earth-moving machinery — Operator's field of view — Test method and performance criteria (5006). In.
- International Organization for Standardization (ISO). (2017c). Ergonomic principles related to mental workload — Part 1: General issues and concepts, terms and definitions (10075).
- International Organization for Standardization (ISO). (2017d). Mobile robots — Vocabulary (19649). In.
- International Organization for Standardization (ISO). (2018a). Intelligent transport systems — Adaptive cruise control systems — Performance requirements and test procedures (15622). In.
- International Organization for Standardization (ISO). (2018b). Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use (45001). Retrieved from https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/archive/pdf/en/iso_45001_briefing_note.pdf
- International Organization for Standardization (ISO). (2018c). Road vehicles — Functional safety — Part 1: Vocabulary (26262-1).
- International Organization for Standardization (ISO). (2018d). Road vehicles — Functional safety — Part 11: Guidelines on application of ISO 26262 to semiconductors (26262).
- International Organization for Standardization (ISO). (2018e). Security and resilience — Emergency management — Guidelines for incident management (22320).
- International Organization for Standardization (ISO). (2019a). Earth-moving machinery and mining — Autonomous and semi-autonomous machine system safety (17757). In.
- International Organization for Standardization (ISO). (2019b). Electrically propelled road vehicles — Safety specifications — Part 1: Rechargeable energy storage system (RESS) (6469-1).
- International Organization for Standardization (ISO). (2019c). Ergonomics of human-system interaction — Part 210: Human-centred design for interactive systems (9241-210).
- International Organization for Standardization (ISO). (2019d). Intelligent transport systems — Cooperative ITS — Using V2I and I2V communications for applications related to signalized intersections (19091).
- International organization for Standardization (ISO). (2019e). Security and resilience — Business continuity management systems — Requirements (22301).
- International Organization for Standardization (ISO). (2020a). Earth-moving machinery — Laboratory evaluation of operator seat vibration (7096).
- International Organization for Standardization (ISO). (2020b). Ergonomics of human-system interaction — Part 110: Interaction principles(9241-110).

- International organization for Standardization (ISO). (2020c). Intelligent transport systems — Station and communication architecture (21217).
- International Organization for Standardization (ISO). (2020d). Safety identification — Escape and evacuation plan signs (23601).
- International organization for Standardization (ISO). (2021a). Condition monitoring and diagnostics of machine systems — Requirements for certification of personnel — Part 1: Sector specific requirements for certification bodies and the certification process (18436-1).
- International Organization for Standardization (ISO). (2021b). Electrically propelled road vehicles — Safety specifications — Part 3: Electrical safety (6469-3).
- International Organization for Standardization (ISO). (2021c). Forestry and gardening machinery — Vibration test code for portable hand-held machines with internal combustion engine — Vibration at the handles (22867).
- International organization for Standardization (ISO). (2021d). Intelligent transport systems — Low-speed automated driving (LSAD) systems for predefined routes — Performance requirements, system requirements and performance test procedures (22737).
- International Organization for Standardization (ISO). (2021e). Occupational health and safety management — Psychological health and safety at work — Guidelines for managing psychosocial risks (45003).
- International Organization for Standardization (ISO). (2021f). Road vehicles — Symbols for controls, indicators and tell-tales (2575).
- International Organization for Standardization (ISO). (2023a). Cybersecurity — Guidelines for Internet security (27032).
- International Organization for Standardization (ISO). (2023b). Industrial trucks — Safety requirements and verification — Part 4: Driverless industrial trucks and their systems (3691-4). In.
- International Organization for Standardization (ISO). (2023c). Road vehicles — Degrees of protection (IP code) — Protection of electrical equipment against foreign objects, water and access (20653).
- International Organization for Standardization (ISO). (2023d). Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 2: Electrical loads (16750-2). In.
- International Organization for Standardization (ISO). (2023e). Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 4: Climatic loads (16750-4).
- international organization for Standardization (ISO), I. E. C. I. (2006). Information technology — Security techniques — IT network security — Part 1: Network security management (18028-1).
- international organization for Standardization (ISO), I. E. C. I. (2010). Information technology — Radio frequency identification for item management — Part 3: Parameters for air interface communications at 13,56 MHz (18000-3).
- international organization for Standardization (ISO), I. E. C. I. (2012). Conformity assessment — Requirements for bodies certifying products, processes and services (17065).

- International organization for Standardization (ISO), I. E. C. I. (2014). Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Guide to SQuaRE (25000).
- international organization for Standardization (ISO), I. E. C. I. (2015). Information technology — Security techniques — Network security — Part 1: Overview and concepts (27033-1).
- international organization for Standardization (ISO), I. E. C. I. (2018). Internet of Things (IoT) — Reference Architecture (30141).
- international organization for Standardization (ISO), I. E. C. I. (2022). Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security controls (27002).
- Jocelyn, S., Burlet-Vienney, D., Giraud, L., & Sghaier, A. (2017). Robotique collaborative Évaluation des fonctions de sécurité et retour d'expérience des travailleurs, utilisateurs et intégrateurs au Québec.
- KMC, S. (2021). *What the heck is an automated guided vehicle?*
- KMC SRLS. (2021). What the heck is an automated guided vehicle?
- Kolbeinsson, A., Lagerstedt, E., & Lindblom, J. (2019). Foundation for a classification of collaboration levels for human-robot cooperation in manufacturing. *Production and Manufacturing Research*, 7(1), 448-471. doi:10.1080/21693277.2019.1645628
- L'institut national de recherche et de sécurité (INRS). (2018). Tutoprév' pédagogie.
- Laberge, M., & Tondoux, A. (2018). IDENTIFIER LES RISQUES À LA SANTÉ ET À LA SÉCURITÉ DU TRAVAIL.
- Laciok, V., Sikorova, K., Fabiano, B., & Bernatik, A. (2021). Trends and opportunities of tertiary education in safety engineering moving towards safety 4.0. *Sustainability (Switzerland)*, 13(2), 1-21. doi:10.3390/su13020524
- Laliberté, L. (1996). Guide de mesure du rayonnement ultraviolet.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business and Information Systems Engineering*, 6(4), 239-242. doi:10.1007/s12599-014-0334-4
- Lauritano, D., Moreo, G., Limongelli, L., Nardone, M., & Carinci, F. (2020). Environmental disinfection strategies to prevent indirect transmission of SARS-CoV2 in healthcare settings. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(18). doi:10.3390/APP10186291
- LSST. Obligations et droits des employeurs et des travailleurs. Retrieved from <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cs/s-2.1>
- Lynch, L., McGuinness, F., Clifford, J., Rao, M., Walsh, J., Toal, D., & Newe, T. (2019). *Integration of autonomous intelligent vehicles into manufacturing environments: Challenges*. Paper presented at the Procedia Manufacturing.
- MacDougall, W. (2014). *Industrie 4.0: Smart Manufacturing for the Future*: Germany Trade & Invest.
- Marková, P., Prajová, V., Homokyová, M., & Horváthová, M. (2019). *Human factor in industry 4.0 in point of view ergonomics in slovak republic*. Paper presented at the Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium.

- Mehami, J., Nawi, M., & Zhong, R. Y. (2018). *Smart automated guided vehicles for manufacturing in the context of Industry 4.0*. Paper presented at the Procedia Manufacturing.
- Mhlanga, D. (2020). Industry 4.0 in finance: the impact of artificial intelligence (ai) on digital financial inclusion. *International Journal of Financial Studies*, 8(3), 1-14. doi:10.3390/ijfs8030045
- Min, J., Kim, Y., Lee, S., Jang, T. W., Kim, I., & Song, J. (2019). The Fourth Industrial Revolution and Its Impact on Occupational Health and Safety, Worker's Compensation and Labor Conditions. *Safety and Health at Work*, 10(4), 400-408. doi:10.1016/j.shaw.2019.09.005
- Ministère de l'Économie et de l'Innovation. (2018). Industrie 4.0 : les défis de la quatrième révolution industrielle. *La Tribune*. Retrieved from <https://www.latribune.ca/2018/10/18/industrie-40--les-defis-de-la-quatrieme-revolution-industrielle-71e0daa226c0b7dabe646a12b81449a9>
- Ministère du Travail, d. l. F. e. d. D. d. c. (2014). Risques liés au travail dans les entrepôts, Sécurité au travail Ontario. Retrieved from https://www.labour.gov.on.ca/french/hs/sawo/pubs/fs_warehouse.php
- Morgado, L., Silva, F. J. G., & Fonseca, L. M. (2019). *Mapping occupational health and safety management systems in Portugal: Outlook for ISO 45001:2018 adoption*. Paper presented at the Procedia Manufacturing.
- Mouras, F., & Badri, A. (2020). Survey of the risk management methods, techniques and software used most frequently in occupational health and safety. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 10(2), 149-160. doi:10.18280/ijss.100201
- National Institute for occupational safety and health (NIOSH). (2001). Preventing Injuries and Deaths of Workers Who Operate or Work Near Forklifts (2001-109).
- National Institute of Standards and Technology (NIST). (2003). Building an Information Technology Security Awareness and Training Program (SP 800-50).
- National Institute of Standards and Technology (NIST). (2011). Managing Information Security Risk: Organization, Mission, and Information System View (SP 800-39).
- National Institute of Standards and Technology (NIST). (2020). Security and Privacy Controls for Information Systems and Organizations (SP 800-53).
- National Institute of Standards and Technology (NIST). (2021). Technical Guide to Information Security Testing and Assessment (SP 800-115).
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2018). Occupational Exposure to Respirable Crystalline Silica (29 CFR 1910.1053).
- OIT, I. L. O. (2017). ILO head calls for global coalition on safety and health at work. Retrieved from https://www.ilo.org/global/about-the-ilo/newsroom/news/WCMS_573118/lang--en/index.htm
- Pao, W. (2019). *Design and Development of Hydrophobic and Protective Polymer-based Spray Coatings for Treating Glass Surfaces in Building and Automotive Applications*.
- Papa, M., Kaselautzke, D., Stuja, K., & Wölfel, W. (2018). *Different safety certifiable concepts for mobile robots in industrial environments*. Paper presented at the Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium.

- Pistolesi, F., & Lazzerini, B. (2020). Assessing the Risk of Low Back Pain and Injury via Inertial and Barometric Sensors. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(11), 7199-7208. doi:10.1109/TII.2020.2992984
- PMBOK, P. M. I. (2008). A guide to the project management body of knowledge (PMBOK Guide). Retrieved from <http://www.books24x7.com/marc.asp?bookid=29854>
- Podgórski, D., Majchrzycka, K., Dąbrowska, A., Gralewicz, G., & Okrasa, M. (2017). Towards a conceptual framework of OSH risk management in smart working environments based on smart PPE, ambient intelligence and the Internet of Things technologies. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 23(1), 1-20. doi:10.1080/10803548.2016.1214431
- Raeiszadeh, M., & Adeli, B. (2020). A Critical Review on Ultraviolet Disinfection Systems against COVID-19 Outbreak: Applicability, Validation, and Safety Considerations. *ACS Photonics*, 7(11), 2941-2951. doi:10.1021/acsp Photonics.0c01245
- Romero, D., Mattsson, S., Fast-Berglund, Å., Wuest, T., Gorecky, D., & Stahre, J. (2018). Digitalizing occupational health, safety and productivity for the operator 4.0. In *IFIP Advances in Information and Communication Technology* (Vol. 536, pp. 473-481).
- Romero, D., Stahre, J., Wuest, T., Noran, O., Bernus, P., Fasth, F.-B. Å., & Gorecky, D. (2016). *Towards an Operator 4.0 Typology: A Human-Centric Perspective on the Fourth Industrial Revolution Technologies*.
- Santos, M. Y., Oliveira e Sá, J., Andrade, C., Vale Lima, F., Costa, E., Costa, C., . . . Galvão, J. (2017). A Big Data system supporting Bosch Braga Industry 4.0 strategy. *International Journal of Information Management*, 37(6), 750-760. doi:10.1016/j.ijinfomgt.2017.07.012
- Sergio, M. A., & Manuel, C. R. J. (2020). *Smart protective protection equipment for an accessible work environment and occupational hazard prevention*. Paper presented at the Proceedings of the Confluence 2020 - 10th International Conference on Cloud Computing, Data Science and Engineering.
- Tasdelen, A., & Ozpinar, A. (2020). *OHS 4.0 Approach and Use Case of Indoor Positioning Systems*. Paper presented at the 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, ISMSIT 2020 - Proceedings.
- Tran, H. A. M., Ngo, H. Q. T., Nguyen, T. P., & Nguyen, H. (2018). *Develop of AGV platform to support the arrangement of cargo in storehouse*. Paper presented at the ICAC 2018 - 2018 24th IEEE International Conference on Automation and Computing: Improving Productivity through Automation and Computing.
- Tremblay, A., & Badri, A. (2018a). Assessment of occupational health and safety performance evaluation tools: State of the art and challenges for small and medium-sized enterprises. *Safety Science*, 101, 260-267. doi:10.1016/j.ssci.2017.09.016
- Tremblay, A., & Badri, A. (2018b). A novel tool for evaluating occupational health and safety performance in small and medium-sized enterprises: The case of the Quebec forestry/pulp and paper industry. *Safety Science*, 101, 282-294. doi:10.1016/j.ssci.2017.09.017

- Underwriters Laboratories (UL). (2018). Outline Of Investigation For Automated Guides Vehicles (AGVs).
- Uttendorf, S., Eilert, B., & Overmeyer, L. (2016). *A fuzzy logic expert system for the automated generation of roadmaps for automated guided vehicle systems*. Paper presented at the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management.
- Vivaldini, K. C. T., Rocha, L. F., Becker, M., & Moreira, A. P. (2015). Comprehensive review of the dispatching, scheduling and routing of AGVs. In *Lecture Notes in Electrical Engineering* (Vol. 321 LNEE, pp. 505-514).
- Wang, C., Wang, J., Li, C., Ho, D., Cheng, J., Yan, T., . . . Meng, M. Q. H. (2019). Safe and robust mobile robot navigation in uneven indoor environments. *Sensors (Switzerland)*, *19*(13). doi:10.3390/s19132993
- Wu, J., Tamura, Y., Wang, Y., Woo, H., Moro, A., Yamashita, A., & Asama, H. (2020). Smartphone zombie detection from lidar point cloud for mobile robot safety. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *5*(2), 2256-2263. doi:10.1109/LRA.2020.2970570
- Zaghdoud, R., Mesghouni, K., Dutilleul, S. C., Zidi, K., & Ghedira, K. (2012). *Optimization problem of assignment containers to AIVs in a container terminal*. Paper presented at the IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline).
- Zuber, S., & Brüssow, H. (2020). COVID 19: challenges for virologists in the food industry. *Microbial Biotechnology*, *13*(6), 1689-1701. doi:10.1111/1751-7915.13638

ANNEXES

ANNEXE 1 : Questionnaire - Véhicules autoguidés intelligents

20/09/2023 19:39

Questionnaire « Véhicules autoguidés intelligents »

Véhicules autoguidés intelligents

Nom : _____

Code permanent : _____

SECTION 1 / 10 : INFORMATIONS PERSONNELLES

1.1. 1. Quelle est votre fonction ?

Mots : Caractères : / 4000

1.2. Votre période de travail dans cette entreprise

- 0 à 2 ans
- 2 à 5 ans
- +5ans

1.3. Votre niveau scolaire

- Collégial
- Universitaire
- Autre

1.4. Votre spécialité

Mots : Caractères : / 4000

1.5. Avez-vous été blessé au travail ?

- Oui
- Non

1.6. Avez-vous une certification en santé et sécurité ?

- Oui
- Non

1.7. Combien de temps (Heures/semaine) par semaine allouez-vous pour la gestion de la SST ?

Mots : Caractères : / 4000

SECTION 2 / 10 : INFORMATIONS SUR L'ENTREPRISE

2.1. L'entreprise contient-elle plusieurs départements, ateliers ou usines ?

- Oui
- Non

2.2. Le mauvais fonctionnement de l'usine peut-il entraîner des conséquences sur les autres ?

- Oui
- Non

2.3. Quel est le nombre de travailleurs ?

- 20 à 49
- 50 à 99
- 100 à 299
- 300 à 499

SECTION 3 / 10 : CADRE LÉGISLATIF ET RÉGLEMENTAIRE

| | | Désaccord total | | | | | Accord total |
|------|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 3.1. | Les cadres connaissent les règlements sur la SST | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 |

20/09/2023 19:39

Questionnaire « Véhicules autoguidés intelligents »

| | | | | | | | |
|------|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 3.2. | Les cadres connaissent les règlements sur la SST | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 |
| 3.3. | Les cadres connaissent les normes applicables en SST | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 |
| 3.4. | Les travailleurs connaissent les lois sur la SST | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 |
| 3.5. | Les travailleurs connaissent les règlements sur la SST | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 |
| 3.6. | Les travailleurs connaissent les normes applicables en SST | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 |
| 3.7. | L'entreprise est conforme aux lois sur la SST | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 |
| 3.8. | L'entreprise est conforme aux règlements sur la SST | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 |

3.9. L'entreprise dispose-t-elle d'un calendrier d'inspection sur le terrain ?

- Oui
 Non

3.10. L'entreprise dispose-t-elle d'un registre d'inspection ?

- Oui
 Non

SECTION 4 / 10 : PRISE EN CHARGE DE LA SST

4.1. Les travailleurs bénéficient de formation en SST ?

- Oui
 Non

4.2. Disposez-vous d'une fiche de vérification et maintenance des équipements et de protection collective ?

- Équipement de protection collective
 Fréquence de vérification
 Fréquence de maintenance

4.3. La qualité du milieu de travail (propriété du milieu, qualité de l'air, ambiance thermique, etc.) est-elle contrôlée ?

- Qualité de l'air (% d'O₂, gaz, vapeur, fumée, poussière en suspension)
 Humidité
 L'ambiance thermique
 Le bruit
 La propreté et ordre du milieu de travail
 Autres éléments

SECTION 5 / 10 : LES VÉHICULES AUTOGUIDÉS UTILISÉS (AGV)

5.1. 1. Quels sont les types de véhicules autoguidés (AGV) utilisés dans votre entreprise ?

- Chariots à guidage automatique
 Les remorqueurs à guidage automatique
 Les chariots élévateurs automatisés
 Les AGV-transpalette à fourche
 Les AGV à charge unitaire
 Les AGV de l'extérieur
 Les véhicules autoguidés intelligents (VAI)
 Autre(s)

5.2. Les véhicules mentionnés utilisent-ils le même système de contrôle de ces véhicules ?

- Oui

20/09/2023 19:39

Questionnaire « Véhicules autoguidés intelligents »

Non

5.3. Les véhicules sont-ils supervisés par un ou plusieurs opérateurs ?

Oui
 Non

5.4. 1. Selon vous, quel est le type de véhicule qui représente le plus de risques à l'intérieur de l'entreprise ?

Mots : Caractères : / 4000

5.5. 1. Quel est le véhicule que vous craignez le plus personnellement ?

Mots : Caractères : / 4000

5.6. Arrive-t-il que vous perdiez le contrôle des AGV ?

Oui
 Non

SECTION 6 / 10 : DANGERS PHYSIQUES

6.1. Quels sont les risques apparus qui sont en liens avec les AGV ?

| | | Causes majeurs | | | | Conséquences | | |
|------------------|--------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|------------|-------|
| | | Inattentions humaines | Zones aveugles | Défauts de conception | VAI évitant un obstacle | Blessures légères ou graves | Écrasement | Décès |
| Collision | <input type="checkbox"/> | Inattentions humaines | Zones aveugles | Défauts de conception | VAI évitant un obstacle | Blessures légères ou graves | Écrasement | Décès |

| | | Causes majeurs | | | Conséquences | |
|-------------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------|-------------------------|-----------------------------|-------|
| | | Inattentions humaines | Zones aveugles | VAI évitant un obstacle | Blessures légères ou graves | Décès |
| Chute d'un travailleur | <input type="checkbox"/> | Inattentions humaines | Zones aveugles | VAI évitant un obstacle | Blessures légères ou graves | Décès |

| | | Causes majeurs | | | | Conséquences | | | |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------------------|--|---|--|---------------------------------------|------------|------------|-------|
| | | Objet mal placé dans le rayonnage | Mauvaise fixation d'un objet sur l'AGV | Arrêt brusque d'un AGV portant un objet | Collision d'un AGV avec un travailleur | Collision entre deux ou plusieurs AGV | Explosions | Écrasement | Décès |
| Chute d'objets | <input type="checkbox"/> | Objet mal placé dans le rayonnage | Mauvaise fixation d'un objet sur l'AGV | Arrêt brusque d'un AGV portant un objet | Collision d'un AGV avec un travailleur | Collision entre deux ou plusieurs AGV | Explosions | Écrasement | Décès |

| | | Causes majeurs | | | Conséquences | | |
|------------------------------|--------------------------|---|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------|-------|
| | | Un travailleur coincé entre deux chariots liés à un AGV | Un AGV n'a pas détecté un travailleur | Un VAI évitant un obstacle | Blessures légères ou graves | Écrasement | Décès |
| Manutention mécanique | <input type="checkbox"/> | Un travailleur coincé entre deux chariots liés à un AGV | Un AGV n'a pas détecté un travailleur | Un VAI évitant un obstacle | Blessures légères ou graves | Écrasement | Décès |

| | | Causes majeurs | | Conséquences | | |
|---------------------|--------------------------|--|--|--------------|--------|----------------------|
| | | Présence d'un travailleur lors de l'utilisation des UV | | Brûlures | Cancer | Mutations génétiques |
| Rayonnements | <input type="checkbox"/> | Présence d'un travailleur lors de l'utilisation des UV | | Brûlures | Cancer | Mutations génétiques |

Autres

- Cliquez ici pour précisez les autres dangers
- Cliquez ici pour précisez les causes majeurs de ces dangers
- Cliquez ici pour précisez les conséquences de ces dangers

6.8. Selon vous, quels sont les plus fréquents parmi ces risques ?

Mots : Caractères : / 4000

6.9. Quels sont les actions prises après l'apparition d'un accident ?

Mots : Caractères : / 4000

SECTION 7 / 10 : DANGERS TECHNOLOGIQUES

7.1. Quels sont les risques apparus qui sont en liens avec les AGV ?

| | | Causes majeurs | | Conséquences | | | |
|------------------------|--|---|--|--|--|---|--------------------------------|
| | | Introduction de virus informatique | Piratage de données sensibles | Stress due à la sous-pression | Surcharge physique et mentale | Dégâts physiques | Décès |
| Cybers attaques | | <input type="checkbox"/> Introduction de virus informatique | <input type="checkbox"/> Piratage de données sensibles | <input type="checkbox"/> Stress due à la sous-pression | <input type="checkbox"/> Surcharge physique et mentale | <input type="checkbox"/> Dégâts physiques | <input type="checkbox"/> Décès |

| | | Causes majeurs | Conséquences | |
|---|--|--|--|--|
| | | Arrêt ou mauvais fonctionnement du wifi | Stress due à la sous-pression | Surcharge physique et mentale |
| Déconnexion du système AGV des véhicules | | <input type="checkbox"/> Arrêt ou mauvais fonctionnement du wifi | <input type="checkbox"/> Stress due à la sous-pression | <input type="checkbox"/> Surcharge physique et mentale |

| | | Causes majeurs | Conséquences | | | |
|----------------------------------|--|--|--|--|---|--------------------------------|
| | | Intégration d'un ou de plusieurs AGV soumis à un système AGV différent de celui de l'entreprise | Stress due à la sous-pression | Surcharge physique et mentale | Dégâts physiques | Décès |
| Perte de contrôle des AGV | | <input type="checkbox"/> Intégration d'un ou de plusieurs AGV soumis à un système AGV différent de celui de l'entreprise | <input type="checkbox"/> Stress due à la sous-pression | <input type="checkbox"/> Surcharge physique et mentale | <input type="checkbox"/> Dégâts physiques | <input type="checkbox"/> Décès |

Autres

- Cliquez ici pour précisez les autres dangers
- Cliquez ici pour précisez les causes majeurs de ces dangers
- Cliquez ici pour précisez les conséquences de ces dangers

7.6. Selon vous, quels sont les plus fréquents parmi ces risques ?

Mots : Caractères : / 4000

7.7. Quels sont les actions prises après l'apparition d'un accident ?

20/09/2023 19:39

Questionnaire « Véhicules autoguidés intelligents »

Mots : Caractères : / 4000

SECTION 8 / 10 : DANGERS ENVIRONNEMENTAUX**8.1.** Sélectionnez les états du milieu qui se présentent où les AGV fonctionnent

- Surfaces du milieu lisses et glissantes
- Surfaces dégradées
- Sol isolé
- Présence du vent fort concernant les AGV/VAI de l'extérieur

8.2. Selon vous, le flux lumineux des milieux où les AGV fonctionnent est-il suffisant ?

- Oui
- Non

8.3. Les AGV de l'extérieur fonctionnent-ils lors de la présence d'une forte pluie ou un mouvement de poussière fort ?

- Oui
- Non

8.4. Se trouve-t-il parfois un obstacle qui se trouve en un niveau de surface plus bas que celle où se situe un AGV ?

- Oui
- Non

SECTION 9 / 10 : DANGERS ERGONOMIQUES**9.1.** Existe-t-il toujours des tâches répétitives concernant les travailleurs en collaboration avec les AGV ?

- Oui
- Non

9.2. Concernant les opérateurs qui surveillent les AGV, travaillent-ils en position assise d'une longue durée ?

- Oui
- Non

SECTION 10 / 10 : ETAT DE SANTÉ DES TRAVAILLEURS (RISQUES PSYCHOSOCIAUX ET MENTAUX)**10.1.** Quel est le nombre des travailleurs qui collaborent avec les AGV ?

Mots : Caractères : / 4000

10.2. Sont-ils formés avant l'introduction de AGV ?

- Oui
- Non

10.3. Selon vous, comment sentent ces travailleurs le climat social de l'entreprise ?

- Mauvais
- Moyen
- Bon

10.4. Depuis l'introduction des AGV, avez-vous remarqué des changements de l'état des travailleurs ?

- Oui
- Non

10.5. Depuis l'introduction des AGV, y a-t-il des travailleurs qui ont abandonné leurs postes de collaborations avec les AGV ?

20/09/2023 19:39

Questionnaire « Véhicules autoguidés intelligents »

- Oui
 Non

10.6. Depuis l'introduction des AGV, avez-vous remarqué l'une des situations suivantes concernant les travailleurs ?

- La peur de perdre son travail
 Déconcentration du travailleur
 Manque d'attention
 Augmentation de stress
 Sentiments de solitude
 Surcharge mentale
 Autres

10.7. Quels sont les actions prises après avoir remarqué l'une de ces situations ?

Mots : Caractères : / 4000

10.8. Les travailleurs collaborant avec les AGV, ont-ils développé des maladies au fil du temps ?

- Dépression
 Anxiété
 Problèmes cardiaques
 Troubles musculosquelettiques (TMS)
 Fatigue physique et/ou mentale
 Effets physiologiques
 Douleur
 Inconfort
 Autres

10.9. Quels sont les actions prises après avoir remarqué l'une de ces situations ?

Mots : Caractères : / 4000

ANNEXE 2 : Liste des publications en lien avec le mémoire

Présentation d'articles :

Mabsout, A., Badri, A. et Kelouwani, S. (2023) Risques de SST reliés à l'usage des véhicules autoguidés dans le contexte de l'Industrie 4.0. Dans CIGI Qualita MOSIM 2023, Trois-Rivières, Québec, Canada.

Présentations orales :

Mabsout, A., Badri, A. et Kelouwani, S. (2023) Risques de SST reliés à l'usage des véhicules autoguidés dans le contexte de l'Industrie 4.0. Dans CIGI Qualita MOSIM 2023, Trois-Rivières, Québec, Canada.