

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

**ÉTUDE EXPLORATOIRE DES OPPORTUNITÉS ET MENACES
POTENTIELLES DES TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE 4.0 SUR LA
SANTÉ ET LA SÉCURITÉ DU TRAVAIL EN CONTEXTE DE
TRANSFORMATION NUMÉRIQUE DES PME MANUFACTURIÈRES
QUÉBÉCOISES**

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

Par

MARAL HAJ MOHAMMADHOSSEINI

JUIN 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. Foued Chihi

Codirecteur de recherche, UQTR

Jury d'évaluation :

M. Adel Badri,

Directeur de recherche, UQTR

M. François Gauthier

Département de génie industriel, UQTR

Mme. Stéphanie Austin

Département de gestion des RH, UQTR

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier sincèrement mon directeur, M. Adel Badri et mon codirecteur, M. Foued Chihi, qui ont fait preuve d'une grande disponibilité, de soutien et de patience et ont su me prodiguer de nombreux conseils avisés tout au long de mon parcours. Ceux-ci m'ont permis de progresser dans le processus fastidieux de la rédaction d'un mémoire.

Ma gratitude va également aux gestionnaires de PME manufacturières québécoises pour le temps qu'ils ont consacré à répondre à mon questionnaire. Ce projet n'aurait pu être possible sans leur précieuse collaboration.

Je tiens à remercier les membres du jury qui ont évalué mon travail de recherche.

Enfin, je voudrais remercier toute ma famille. Mon époux, mon frère et surtout ma mère à qui je dédie ce mémoire.

RÉSUMÉ

La communication en temps réel, l'exploitation des mégadonnées, la coopération homme-machine, le pilotage et la surveillance à distance, les équipements autonomes et la connectivité sont considérés comme des atouts non négligeables pour l'industrie actuelle. Puisque la quatrième révolution industrielle (Industrie 4.0) se concrétise de plus en plus, il semble évident qu'elle conduira à un changement de paradigmes industriels qui influencera la prise en compte de la santé et la sécurité au travail (SST).

Il est clair que tant que les groupes technologiques de l'Industrie 4.0 seront développés de manière isolée et que les initiatives des fabricants seront fragmentées, les dangers vont se multiplier, ce qui n'améliorera pas la SST. Tout au long de cette période en pleine mutation, il est évident que certains acquis en prévention seront perdus. Pour remédier à ces contraintes, les chercheurs, les experts et les industriels doivent collaborer afin de mettre en place des solutions qui se basent sur une vision d'ensemble dans le but d'assurer une transition maîtrisée vers l'Industrie 4.0.

Ce travail de recherche a pour but de mener une étude exploratoire afin de mieux comprendre les opportunités et les menaces de SST auxquelles les travailleurs font face en contexte de l'industrie 4.0. Un portrait des risques sera élaboré puis amélioré et précisé au bénéfice de tous les travailleurs québécois confrontés à ce contexte.

La mise en œuvre de ce projet de recherche compte trois étapes. La première étape a été dédiée à l'identification des opportunités et des menaces potentielles en matière de SST des technologies de l'Industrie 4.0, à partir d'une revue de la littérature et de l'élaboration d'un portrait initial. La deuxième étape a consisté à confirmer ces éléments sur le terrain, par la consultation de 32 PME manufacturières québécoises. La troisième étape a été consacrée à l'analyse des données dans le but de créer un portrait exploitable des opportunités et des menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST.

TABLES DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	IV
RÉSUMÉ.....	V
TABLES DES MATIÈRES.....	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES ANNEXES	XII
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	XIII
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	2
1.1 Industrie 4.0.....	2
1.1.1 Contexte historique de l’Industrie 4.0.....	2
1.1.2 Avantages et défis de l’Industrie 4.0.....	3
1.1.3 Transition numérique vers l’Industrie 4.0.....	6
1.1.4 Groupes technologiques de l’Industrie 4.0	10
1.2 Les petites et moyennes entreprises (PME)	19
1.2.1 Industrie 4.0 en contexte de PME.....	21
1.2.2 Migration des PME vers l’Industrie 4.0.....	23
1.3 Régime québécois de santé et de sécurité du travail	25
1.3.1 PME manufacturière à l’ère de l’Industrie 4.0.....	29
1.3.2 Santé et de sécurité du travail en contexte de PME.....	33
1.3.3 Influence potentielle de l’Industrie 4.0 sur la SST	36
1.3.4 Portrait initial des opportunités et menaces potentielles des technologies de l’Industrie 4.0 sur la SST	51
1.3.5 Gestion des risques et évaluation de la performance en SST	57
1.3.6 Exemples d’outils ou méthodes d’évaluation de la performance en SST.	64
CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIF DE RECHERCHE.....	72
2.1 Problématique de recherche	72

2.1.1	Contraintes des PME manufacturières	72
2.1.2	Risques émergents associés aux technologies de l'Industrie 4.0	74
2.1.3	Absence de normes ou de réglementations adaptées aux technologies l'Industrie 4.0	75
2.2	Objectifs de recherche	77
2.3	Les questions de recherche	77
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE		78
3.1	Démarche méthodologique de la recherche	78
3.2	Élaboration d'un portrait initial des opportunités et des menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST	79
3.3	Collecte des données	80
3.3.1	Choix et description de l'échantillon	80
3.3.2	Élaboration du questionnaire	81
3.3.3	Validation du questionnaire	82
3.3.4	Envoi du questionnaire	82
3.4	Analyse des données afin d'élaborer un portrait pratique des opportunités et menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST	82
CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS		84
4.1	Résultats relatifs aux caractéristiques de l'entreprise	84
4.2	Quelques informations sur les répondants	85
4.3	Résultats relatifs à la prise en charge de la SST	87
4.4	Résultats relatifs à la mise en œuvre de l'Industrie 4.0	89
4.5	Résultats relatifs aux opportunités des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST	95
4.6	Résultats relatifs aux menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST	104
4.7	Discussions des résultats	112
4.7.1	Les opportunités des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST	112
4.7.2	Les menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST	117
4.8	Limites et travaux futurs	125
CONCLUSION		127
LISTE DES RÉFÉRENCES		128

ANNEXES..... 155

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Les avantages et défis de l'Industrie 4.0	6
Tableau 1.2 Les intervenants en SST et leurs mandats (Adapté de Bérubé, 2004)	28
Tableau 1.3 Caractéristiques d'une PME manufacturière ayant des composantes 4.0 (Adapté de Kolla et al., 2019).....	32
Tableau 1.4 Portrait initial des opportunités et menaces potentielles des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST en contexte d'une transformation numérique des PME manufacturières	52
Tableau 1.5 Outils et méthodes d'évaluation de la performance en SST	70
Tableau 4.1 Résultats pour la famille des caractéristiques de l'entreprise	85
Tableau 4.2 Quelques informations sur les répondants	86
Tableau 4.3 Prise en charge de la SST.....	88
Tableau 4. 4 Mise en œuvre de l'Industrie 4.0	94
Tableau 4. 5 Opportunités de mégadonnées et de l'infonuagique sur la SST	96
Tableau 4. 6 Opportunités de l'intelligence artificielle sur la SST	97
Tableau 4.7 Opportunités de robotique collaborative sur la SST	98
Tableau 4.8 Opportunités de la simulation sur la SST.....	99
Tableau 4.9 Opportunités de l'Internet des objets ou des services et des systèmes cyberphysiques sur la SST	100
Tableau 4.10 Opportunités de la réalité augmentée sur la SST	101
Tableau 4.11 Opportunités de jumeaux numériques sur la SST	102
Tableau 4.12 Opportunités de fabrication additive sur la SST	103
Tableau 4.13 Menaces des mégadonnées et de l'infonuagique sur la SST.....	104
Tableau 4.14 Menaces de l'intelligence artificielle sur la SST.....	105
Tableau 4.15 Menaces de la robotique collaborative sur la SST	106
Tableau 4.16 Menaces de la simulation sur la SST	108
Tableau 4.17 Menaces d'Internet des objets ou des services et des systèmes cyberphysiques sur la SST	109

Tableau 4.18 Menaces de la réalité augmentée sur la SST.....	110
Tableau 4.19 Menaces des jumeaux numériques sur la SST	111
Tableau 4. 20 Menaces de la fabrication additive sur la SST	112
Tableau 4.21 Les principales opportunités et menaces identifiées dans la recherche .	122

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Technologies de l’Industrie 4.0	11
Figure 1.2 Distribution de l’emploi des entreprises du secteur privé selon la taille de l’entreprise, 2020 (Gouvernement du Canada, 2021)	21
Figure 1.3 Le modèle des compétences numériques (CEFRIIO, 2016).....	24
Figure 2.1 Freins à l’implantation des technologies l’Industrie 4.0 chez des PME (STIQ, 2020).....	73
Figure 2.2 Principaux éléments de la problématique de recherche.....	76
Figure 3.1 Illustration des étapes de la méthodologie.....	79
Figure 4.1 Répartition des sources de dangers survenues dans les PME consultées	88
Figure 4.2 Répartition des compétences spécifiques de l’Industrie 4.0.....	91
Figure 4.3 Répartition des technologies de l’Industrie 4.0 utilisées par les PME consultées.....	92
Figure 4.4 Répartition des technologies de l’Industrie 4.0 actuellement utilisées ou à utiliser dans l’avenir par les PME consultées	93

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Certificat d'éthique de la recherche avec les êtres humains	155
ANNEXE 2: Questionnaire - Étude exploratoire des opportunités et des menaces en SST des technologies de l'Industrie 4.0	157
ANNEXE 3: Formulaire d'information et de consentement	168
ANNEXE 4: Lettre d'invitation à répondre au questionnaire	174
ANNEXE 5: Lettre de rappel aux PME.....	176

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ASP : Associations sectorielles paritaires
 ASSE : American Society of Safety Engineers
 BEM : Bureau d'évaluation médicale
 BS : British Standards
 CAD : Computer-aided design
 CAT : Commission des accidents du travail
 CÉRÊH : Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains
 CES : Commission de l'équité salariale
 CNESST : Commission des normes, de l'égalité, de la santé et de la sécurité au travail
 CNT : Commission des normes du travail
 CPS : Systèmes cyberphysiques
 CSS : Comité de santé et de sécurité
 CSST : Commission de la santé et de la sécurité du travail
 DNSSE: Domain Name System Security Extensions
 ÉPC : Équipements de protection collective
 ÉPI : Équipements de protection individuelle
 FA : Fabrication additive
 FAHP : Fuzzy analytic hierarchy process
 FDEA : Fuzzy data envelopment analysis
 IA : Intelligence artificielle
 IEU : Instrument d'évaluation universel
 IG : Indice de gravité
 IoS : Internet des services
 IoT : Internet des objets
 IRSST : Institut de recherche Robert–Sauvé en santé et en sécurité du travail
 LAT : Loi sur les accidents du travail
 LATMP : Les accidents de travail et les maladies professionnelles
 LSST : Loi sur la santé et la sécurité au travail
 MES : La méthode des éléments de sécurité
 MSI : Modèle structurel interprétatif
 ISO : Organisation Internationale de Normalisation
 PAH : processus d'analyse hiérarchique
 PIR : Priority Information Report
 PME : petites et moyennes entreprises
 PP : programme de prévention
 P2P : Peer-to-Peer
 RA : La réalité augmentée

RFID : Radio Frequency Identification
RP : Représentant à la prévention
RSST : Règlement sur la santé et la sécurité du travail
SGE : système de gestion environnementale
SGSST : Système de gestion de santé et la sécurité au travail
SMSSE : Système de management santé sécurité environnement
STL : STereoLithography
SST : Santé et sécurité du travail
TAT : Tribunal administratif du travail
TF : Taux de fréquence
TG : Taux de gravité
TIC : Technologies de l'information et de la communication
TLS : Transport Layer Security
TMS : Troubles musculosquelettiques
VPN : Virtual Private Network
3D : Trois dimensions

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'industrie manufacturière joue un rôle essentiel dans l'économie canadienne, en particulier, l'industrie québécoise qui est connue pour sa forte présence en PME. Toutefois, l'arrivée de l'Industrie 4.0 a entraîné une révolution dans le secteur manufacturier grâce à l'intégration harmonisée de plusieurs nouvelles technologies. Malgré les nombreuses publications et études scientifiques sur l'Industrie 4.0, peu se concentrent sur la prise en charge de la SST. En conséquence, il est important d'étudier les opportunités et les menaces de chacune des technologies de l'industrie 4.0 sur la SST, lors de la transition des PME vers l'industrie 4.0.

L'objectif principal de ces travaux de recherche est d'élaborer un portrait pratique des opportunités et des menaces potentielles des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST, dans le contexte de transformation numérique des PME manufacturières québécoises. Pour ce faire, deux objectifs spécifiques sont définis : une revue de la littérature pour établir un portrait initial, suivi d'une consultation d'un échantillon représentatif de PME québécoises pour pouvoir affiner et adapter le portrait initial à la réalité du secteur manufacturier.

Ce mémoire a été structuré de la manière suivante : le premier chapitre présente la revue de la littérature, qui constitue la base du cadre théorique de l'étude. Le deuxième chapitre détaille la problématique et les objectifs de la recherche. Le troisième chapitre synthétise la méthodologie de recherche adoptée pour cette étude. Enfin, le quatrième chapitre présente une analyse des données afin d'élaborer un portrait pratique des opportunités et des menaces des technologies de l'Industrie 4.0 dans le domaine de la SST dans les PME manufacturières québécoises.

CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE

L'objectif principal de cette revue de la littérature est d'identifier les opportunités et les menaces des technologies de l'Industrie 4.0 en SST dans les petites et moyennes entreprises (PME) manufacturières. Le chapitre est divisé en trois parties principales. La première partie, la Section (1.1), aborde l'Industrie 4.0. La section (1.2) se concentre sur les PME et traite de l'Industrie 4.0 dans le contexte des PME, de la migration des PME vers l'Industrie 4.0 et des PME manufacturières à l'ère de l'Industrie 4.0. Enfin, la troisième section (1.3) donne un aperçu du régime québécois de SST. Elle explique la SST dans le contexte des PME et l'impact de l'Industrie 4.0 sur la SST.

1.1 Industrie 4.0

1.1.1 Contexte historique de l'Industrie 4.0

C'est en Grande-Bretagne que la première révolution industrielle (Industrie 1.0) a vu le jour (1760-1830). Ceci, principalement, grâce à l'invention de la machine à vapeur. Durant cette révolution, l'énergie mécanique est venue au secours de l'homme pour rendre des tâches auparavant difficiles beaucoup plus simples (Mohajan, 2019). La mécanisation des chaînes de montage de Henry Ford vers l'année 1913 a fait place à la deuxième révolution industrielle (Industrie 2.0). Une révolution marquée par la répartition de la tâche et la production de masse grâce à l'énergie électrique (Kagermann et al., 2013). Quant à elle, la troisième révolution industrielle (Industrie 3.0) a débuté aux alentours de l'année 1970, avec l'introduction de l'automatisation dans les lieux de travail. Dans l'Industrie 3.0, l'utilisation de la technologie a résolu certains problèmes opérationnels causés par les limitations liées aux capacités individuelles (Simon, 2020).

Les ordinateurs ont joué un rôle important dans le processus de production. La programmation, la conception des machines et la présence de robots ont conduit à la

transformation de la production vers une production de masse de plus en plus organisée (Danjou et al., 2017a; Danjou et al., 2017b).

Le terme « Industrie 4.0 » a été mentionné pour la première fois en 2011, en Allemagne, pour faire référence à une proposition de solutions pour le développement de la politique économique allemande, basée de plus en plus sur la haute technologie (Simon, 2020). La connectivité entre les objets représente le fondement de la quatrième révolution industrielle, ou Industrie 4.0. Dans cette foulée, plusieurs notions commencent à gagner de l'intérêt dans le milieu manufacturier, comme les systèmes de production cyberphysiques, l'Internet des objets (IoT), l'Internet des services (IoS), les capteurs, etc. (Ning et Liu, 2015; Lasi et al., 2014). L'Industrie 4.0 est annoncée comme une révolution qui augmente la flexibilité et la capacité des systèmes industriels en collectant et utilisant des données à partir de diverses sources. Ceci a aidé à accélérer le processus de prise de décision. L'Industrie 4.0 a établi une nouvelle ère d'agilité en coordonnant les processus de production en temps réel (Köhler et Weisz, 2016). L'Industrie 4.0 modifie les principes de relations consommateurs-industriels et oblige les parties prenantes à s'adapter à des produits et des processus intelligents (Wynstra et al., 2015).

1.1.2 Avantages et défis de l'Industrie 4.0

La mise en place des systèmes numériques et leur intégration dans la stratégie de l'entreprise auront un impact positif sur la performance de l'entreprise. D'autre part, la numérisation des équipements et leur interconnectivité présentent des défis majeurs (Lorenz et al., 2015).

En général, les entreprises, et surtout les PME, doivent investir, considérablement, pour intégrer ces nouvelles technologies numériques (Moeuf et al., 2018). Par conséquent, il est essentiel de développer une stratégie de transition vers l'Industrie 4.0 et un programme de transformation numérique prenant en compte de meilleures décisions d'investissement et d'intégration des nouvelles technologies dans les processus actuels (Danjou et al., 2017a). Ce programme doit être étroitement lié au plan stratégique de l'entreprise. La

valeur ajoutée, créée par les données numériques, entraîne des changements aux niveaux managérial et opérationnel (Danjou et al., 2017b).

Avec l'usage des systèmes autonomes, le besoin en main-d'œuvre traditionnelle diminue (Lorenz et al., 2015). Néanmoins, un nouveau type de travailleurs qui s'adaptent au nouvel environnement, qui sont flexibles face aux changements et qui assument de nouveaux rôles dans le processus de production, sont requis (Hébert et Moudallal, 2016; Lorenz et al., 2015). En conséquence, les compétences et les métiers doivent être compatibles aux nouveaux changements. En remplaçant les humains par des machines dans certaines professions et en augmentant la coopération homme-machine dans l'industrie, certains emplois seront supprimés (Lorenz et al., 2015). Des programmes de formation efficaces sont nécessaires pour développer des compétences spécifiques liées au nouveau contexte industriel. Les gestionnaires doivent être prêts à former régulièrement leur personnel pour suivre les progrès technologiques (Lorenz et al., 2015). La Banque de développement du Canada (BDC) a réalisé en 2017 un sondage auprès de quelque mille entrepreneurs canadiens (BDC, 2017). Selon ce rapport, le premier et le plus important problème, auquel font face les entreprises lors de la transformation numérique, est le manque de main-d'œuvre qualifiée. Soit le manque de compétences spécifiques telles que la créativité, la résolution de problèmes complexes, l'analyse de données, la capacité à prendre des décisions à temps en fonction des dernières données ou informations apparues en temps réel. La sécurité des systèmes informatiques et la flexibilité seront toutes deux importantes (BDC, 2017). De plus, la main-d'œuvre de l'Industrie 4.0 doit acquérir de l'expertise dans des domaines spécifiques, à savoir, l'IoT, la robotique, l'intelligence artificielle, l'automatisation, la programmation, etc. (BDC, 2017).

La numérisation réduit le temps de réponse et les erreurs de performances du système (Danjou et al., 2017a). D'un autre côté, les modèles d'affaires changent radicalement, puisque de plus en plus d'entreprises évoluent vers un modèle d'affaires axé sur les services (Hébert et Moudallal, 2016). Les entreprises peuvent accroître leurs parts du

marché et leurs avantages concurrentiels, grâce à l'innovation basée sur les technologies de l'Industrie 4.0 (Horváth et Szabó, 2019).

Il existe, également, des opportunités pour développer de nouveaux modèles d'affaires et des méthodes de revalorisation qui peuvent offrir de nombreux avantages supplémentaires aux entreprises (Horváth et Szabó, 2019).

Plusieurs facteurs peuvent empêcher les industriels de mettre en œuvre l'Industrie 4.0 comme : la pénurie de main-d'œuvre qualifiée, le manque de connaissances, l'insuffisance des ressources financières, l'incohérence dans les systèmes de gestion, les problèmes de cybersécurité, etc. (Kiel et al., 2017). Le plus grand avantage de l'Industrie 4.0 pour les entreprises manufacturières est la rentabilité et la productivité (Gyorgy et Kot, 2016). Dans le Tableau 1.1 (Sony, 2020; Horváth et Szabó, 2019; Hébert et Moudallal, 2016; Köhler et Weisz, 2016; Lorenz et al., 2015), certains avantages et défis de l'Industrie 4.0 sont mentionnés.

Tableau 1.1 présent les avantages et défis de l'Industrie 4.0 dans les entreprises.

Tableau 1.1 Les avantages et défis de l'Industrie 4.0

Industrie 4.0		
Avantages	Défis	
Améliorer la qualité des produits	Complexifier l'intégration des technologies dans les systèmes de production et de la logistique	
Réduire les coûts d'exploitation		
Favoriser la maintenance prédictive		Uniformiser les processus
Optimiser le besoin en matières premières et en énergie		Mettre en place de nouvelles méthodes de travail et de nouveaux procédés
Faciliter l'identification et la traçabilité des pièces		Mettre en place une gestion des risques liés la cybersécurité
Améliorer la gestion de la logistique		Accéder aux ressources et spécialistes en technologies de l'information
Produire avec agilité		Développer de nouvelles compétences chez les travailleurs
Améliorer la relation avec les clients		
Innover (processus, produits et services)		
Améliorer le pouvoir concurrentiel		
Améliorer les conditions de SST		

1.1.3 Transition numérique vers l'Industrie 4.0

La transition numérique (ou transformation numérique) des entreprises vers l'Industrie 4.0 remet en question la capacité d'innover et le besoin en nouvelles stratégies et en nouveaux modèles organisationnels (Danjou et al., 2017b). Cette transition nécessite également des changements radicaux dans l'organisation de ces entreprises

(infrastructures, processus, procédés de fabrication, technologies de production, ressources humaines, gestion, etc.) (Gilchrist, 2016).

La première étape de la numérisation consiste à modifier et repenser le plan de gestion stratégique en fonction du plan global de transition vers l'Industrie 4.0, en décrivant où se trouve l'entreprise, où aller et comment s'y rendre (Schumacher et al., 2016). Ce plan doit évoquer le principe de modularité qui s'intéresse au passage des systèmes rigides et des modèles de fabrication non flexibles à des systèmes plus agiles qui peuvent s'adapter rapidement à des conditions et à des exigences en constante évolution (Gilchrist, 2016). La modularité s'appuie sur une chaîne d'approvisionnement de plus en plus agile, des systèmes de flux de matières de plus en plus flexibles, des décisions de plus en plus décentralisées et des processus de plus en plus flexibles (Perales et al., 2018).

Les entreprises n'ont pas toutes la maturité numérique nécessaire pour migrer adéquatement vers l'Industrie 4.0 (Gilchrist, 2016; Leyh et al., 2016). Les industriels ayant des systèmes de production ou de service modernes n'ont pas assez de capacité pour gérer l'intégration horizontale et maintenir leur position concurrentielle sur un marché international très concurrentiel (Gilchrist, 2016; Leyh et al., 2016). Cela signifie que les entreprises doivent mieux évaluer tous les aspects organisationnels pour réussir leur transition numérique.

a) Visions de transition vers l'Industrie 4.0

Il existe trois visions documentées jusqu'à présent pour concrétiser la transition numérique des entreprises. Ces stratégies peuvent être utilisées séparément ou ensemble, en fonction de la capacité des entreprises (CEFRIIO, 2016).

- Du côté des processus, l'Industrie 4.0 a révolutionné la fabrication et a fait évoluer le processus de production. L'existence d'une source de données de rétroaction facilite la prise de décision en temps réel. Le but de cette évolution est le passage de la production de masse à une production personnalisée et adaptée aux besoins des clients (Kagermann et al., 2013). L'Industrie 4.0

conduit à la création d'un processus de production flexible avec l'évolution des technologies actuelles dans les entreprises. Il existe différents niveaux d'intégration des technologies dans les entreprises manufacturières. Le choix de ce niveau de technologie dépend du choix de l'entreprise (CEFRIIO, 2016).

- Du côté des produits, ceux-ci peuvent être équipés de capteurs, ce qui facilite la collecte des données de production en temps réel. Cette fonctionnalité permet une réutilisation immédiate des données. Ces données peuvent être utilisées pour développer de nouveaux produits ou pour faire l'analyse des produits existants. Ce sont des produits intelligents, qui, grâce aux différents types de capteurs qui y sont intégrés, peuvent communiquer avec l'environnement et collecter, emmagasiner et transférer des données, tout au long de leurs cycles de vie (Schmidt et al., 2015).
- Du côté des services, avec le développement des nouvelles technologies autonomes, les besoins du marché et des clients évoluent, et pour maintenir la concurrence, des services plus innovants sont nécessaires. Certaines entreprises cherchent à vendre des services plutôt que des produits, ce qui entraîne des changements importants dans les entreprises, comme la fourniture de services en télémédecine (CEFRIIO, 2016).

b) Formes d'intégration de l'Industrie 4.0

L'Industrie 4.0 est un système dynamique et intégré à la chaîne de valeur des entreprises. Il repose sur trois formes d'intégration principales qui le distinguent de l'industrie traditionnelle (Deloitte, 2014).

- L'intégration horizontale implique la prise en compte des facteurs de rentabilité des technologies de l'information et de la communication (TIC) dans la chaîne de valeur de l'entreprise, tels que les fournisseurs de matériaux et d'énergie, les commerçants et les distributeurs (Kagermann et al., 2013). Cette intégration réduit le risque d'analyse erronée des données de production

en accédant au système d'information de plusieurs entreprises. Elle conduit à un enrichissement du cycle produit (Salkin et al., 2018; Suri et al., 2017).

- L'intégration verticale implique la connexion d'équipements et de machines automatisées au réseau de communication et d'information de l'entreprise et la création d'une source commune de toutes les données issues de la production et de l'automatisation. À cet égard, tous les systèmes d'information à tous les niveaux de gestion, de production, de contrôle et de planification sont intégrés les uns aux autres (Kagermann et al., 2013). L'intégration verticale numérise tous les processus au sein de l'entreprise, en tenant compte de toutes les données des processus de fabrication. Par exemple, rendre les données disponibles en temps réel au niveau de la gestion de la qualité et de la planification des opérations (Alcácer et Cruz-Machado, 2019).
- L'intégration de bout en bout repose sur des intégrations verticales et horizontales (Foidl et Felderer, 2016). Cette intégration est reliée au cycle de vie du produit incluant la production, l'utilisation et la fin de vie (Kolla et al., 2019). Cette intégration remplit l'écart entre la conception du produit, la production et le client (Posada et al., 2015). L'objectif de cette intégration est d'intégrer des mondes réels et numériques dans toute la chaîne de valeur d'un produit et dans différentes entreprises tout en répondant aux besoins des clients (Kagermann et al., 2013).

c) Niveaux de capacité de l'Industrie 4.0

Les capacités de surveillance, de contrôle et d'optimisation sont essentielles pour la mise en place d'un système de production efficace (CEFRIIO, 2016). Ces trois caractéristiques sont utilisées pour réaliser un processus industriel indépendant et autonome capable de s'adapter à l'environnement, optimiser des situations actuelles et prendre des décisions en temps réels (Danjou et al, 2017a; Danjou et al, 2017b).

- La surveillance des systèmes numériques et intelligents permet de veiller à la performance globale du système. Grâce à des capteurs externes et à des sources de données, le système envoie des alertes aux utilisateurs ou à d'autres systèmes en cas de problèmes, mais il n'agit pas indépendamment. La surveillance donne accès à un historique de données pour informer les utilisateurs. C'est la première étape pour comprendre les systèmes (Danjou et al, 2017a; CEFRIO, 2016).
- Le contrôle utilise des algorithmes spécifiques basés sur des données historiques. Ces algorithmes permettent de déterminer les conditions de prise de décision si la situation ou l'environnement change. Cette capacité de contrôle permet à l'utilisateur de personnaliser le processus ou le produit et d'interagir avec le système (Danjou et al, 2017b).
- La surveillance des données couplée à la capacité de contrôle du système permet aux entreprises d'optimiser leur performance en planifiant, en temps réel, diverses fonctions de l'entreprise (approvisionnement, contrôle de la qualité, production, distribution, etc.). En conséquence, le système est capable d'analyser les données en temps réel en utilisant diverses méthodes pour améliorer sa performance (CEFRIO, 2016).

1.1.4 Groupes technologiques de l'Industrie 4.0

Les technologies de l'Industrie 4.0 représentent aujourd'hui un large éventail de logiciels et d'équipements qui, une fois connectés, peuvent conduire à l'Industrie 4.0. Les technologies numériques couvrent une vaste étendue de fonctions dans l'entreprise. La gestion et l'administration d'une entreprise reposent également sur plusieurs technologies numériques. La numérisation peut être réalisée avec une maturité numérique, des ressources financières et humaines suffisantes et une refonte de la gestion de la production (Alcácer et Cruz-Machado, 2019). Les technologies numériques sont utilisées dans diverses activités industrielles telles que la production, le stockage, le transport,

l'entreposage et le contrôle. Choisir une technologie en fonction du besoin ou intégrer un ensemble de technologies, ainsi que savoir comment les utiliser est l'un des défis de la transition vers l'Industrie 4.0 (CEFRIIO, 2016).

Onze technologies sont citées dans cette étude (figure 1.1). Toutes ces technologies ne devraient pas obligatoirement être appliquées en même temps. Chaque stratégie numérique demande la combinaison de certaines technologies. Il est parfois rare de voir toutes ces technologies ensemble.

Les onze technologies de l'Industrie 4 sont présentées à la Figure 1.1.

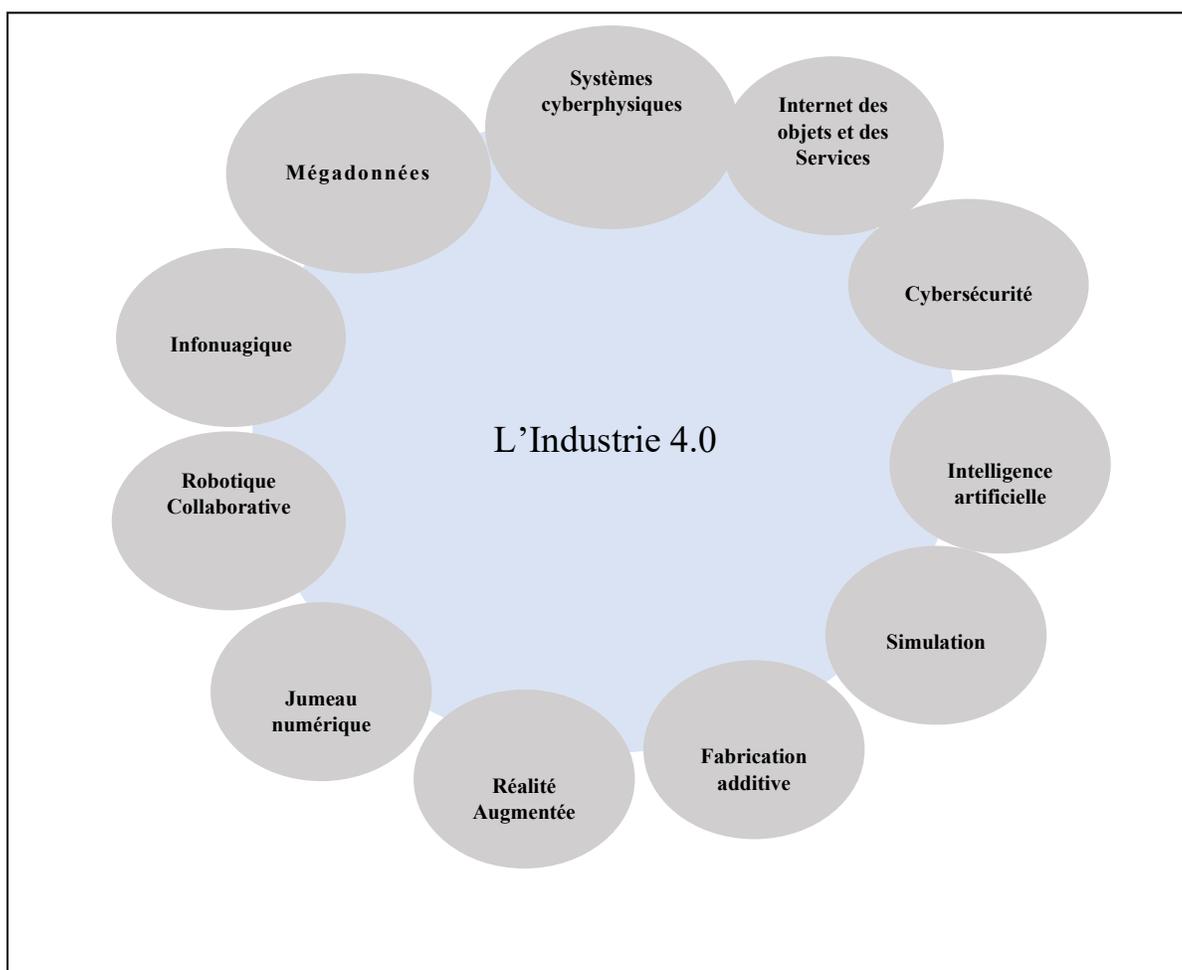


Figure 1.1 Technologies de l'Industrie 4.0

a) Mégadonnées

Les mégadonnées sont conçues pour traiter de gros volumes de données provenant de différentes sources et en différents formats afin de les comprendre et de les utiliser pour prendre de meilleures décisions (Danjou et al., 2017a). L'analyse des données est au cœur des mégadonnées, et sans elle, cette technologie n'a aucune valeur (Babiceanu et Seker, 2016). L'augmentation du degré d'automatisation des systèmes de fabrication intelligents, avec un accès aux données en temps réel, dépend d'algorithmes robustes qui prennent en charge les décisions humaines (Thoben et al., 2017). L'utilisation des mégadonnées dans la production réduit le nombre de travailleurs qualifiés dans le contrôle de la qualité (Tan et al., 2016). Les données peuvent découler du processus, du produit ou des informations clients. L'utilisation des mégadonnées offre un avantage concurrentiel grâce à la possibilité de générer rapidement de la valeur ajoutée (Cheng et al., 2018).

b) Intelligence artificielle

L'intelligence artificielle (IA) est une importante branche avancée de l'informatique qui a été proposée pour la première fois par J. McCarthy en 1955 (Van Assen et al., 2020). Alan Turing, le père de la science informatique, définit les systèmes de l'IA comme des machines qui peuvent fonctionner aussi intelligemment que les humains (Turing, 1950). L'IA est désignée comme un ensemble de systèmes qui peut avoir des réactions similaires aux comportements humains, notamment la compréhension de situations complexes, la simulation des processus de pensée et des pratiques de raisonnement humain, l'apprentissage et l'acquisition des connaissances pour résoudre des problèmes, etc. Le but de l'IA est d'étudier des théories et de développer des systèmes informatiques capables de réaliser des tâches qui demandent une intelligence biologique ou humaine, avec des fonctions telles que les perceptions, la reconnaissance, la prise de décision et le contrôle (Russell et Norvig, 2011). Il est facile de voir que l'IA peut interférer comme la simulation de l'intelligence cérébrale. Par conséquent, un moyen simple de développer l'IA est de la combiner avec la science du cerveau et des domaines connexes, tels que la science de la cognition et la psychologie (Fan et al., 2019). Par exemple, il prend le contrôle des

machines dans le processus de production. Il existe une variété de sources, y compris les réseaux de neurones, l'apprentissage automatique et les réseaux bayésiens (Danjou et al., 2017a).

c) Systèmes cyberphysiques

Les systèmes cyberphysiques (CPS) sont des systèmes qui peuvent échanger indépendamment des informations, stimuler l'action et se contrôler mutuellement (Kagermann et al., 2013). Un CPS est un système dans lequel un mécanisme est contrôlé par des algorithmes informatiques. Dans les systèmes cyberphysiques, les composants physiques et logiciels sont entièrement entrelacés, capables de travailler à différentes échelles spatiales et temporelles, présentant des modèles de comportement multiples et distincts (Peres et al., 2018). Dans l'Industrie 4.0, le système intègre des capteurs et des actionneurs afin que les activités des équipements se fassent en temps réel.

Les CPS peuvent être décrits par une unité de contrôle avec un ou plusieurs microcontrôleurs, capteurs et données qui circulent et qui sont traités en temps réel (Bocciarelli et al., 2017; Jazdi, 2014). En d'autres termes, les CPS peuvent généralement être décrits comme des systèmes physiques et d'ingénierie dont les opérations sont effectuées selon un principe de coordination et d'intégration informatique (Rajkumar et al., 2010). Les CPS comprennent des éléments ou des machines intelligentes qui ont la capacité de communiquer entre elles pour aider dans la planification et les opérations. Ces éléments intelligents peuvent suivre le produit, modifier la stratégie de production ou définir une nouvelle stratégie si nécessaire (Wittenberg, 2016). Les principaux modules de la couche matérielle des CPS sont les suivants (Podgórski et al., 2017; Gisbert et al., 2014) :

- Un réseau de capteurs qui collectent des données sur les travailleurs, comme des données sur les facteurs physiques et chimiques de l'environnement de travail, les paramètres physiologiques des travailleurs et des données sur l'emplacement des travailleurs par rapport aux machines;

- Un réseau de capteurs qui collectent des informations sur la fabrication, c'est-à-dire des données sur l'état actuel des processus de production, les défaillances possibles des équipements et l'emplacement des machines par rapport aux opérateurs;
- Un réseau de capteurs utilisés comme des contrôleurs d'équipements de protection individuelle et collective (ÉPC et ÉPI) (dispositifs de sécurité), dans le but de prévenir ou de réduire la propagation de substances nocives sur le lieu de travail.

d) Robotique collaborative ou Cobotique

Un cobot, ou cobotique (en anglais : "collaborative robot"), est un type de robot conçu pour travailler en collaboration étroite avec les êtres humains dans un environnement de travail partagé. Contrairement aux robots traditionnels, les cobots sont conçus pour interagir et travailler de manière sûre et efficace aux côtés des travailleurs humains, plutôt que de les remplacer (Rashedi et al., 2018). La collaboration homme-robot est généralement définie par l'interaction, directe ou opérée, entre homme(s) et robot(s) pour atteindre un objectif commun (Claverie et al., 2013). Dans l'Industrie 4.0, les robots doivent être de plus en plus interconnectés. La présence des robots en production est nécessaire pour atteindre le niveau de flexibilité souhaité (Pedersen et al., 2016). Les robots sont largement utilisés dans la phase de développement de produit, de fabrication et d'assemblage (Salkin et al., 2018). Ils interagissent de manière semi-autonome entre eux ainsi qu'avec les humains. Les technologies de l'information, la communication, le contrôle et l'IA rendent les robots plus intelligents et plus efficaces. Les cobots sont capables de faciliter le travail à réaliser, de s'adapter aux besoins des clients et de réduire les coûts de production (Salkin et al., 2018).

e) Simulation

La simulation est utilisée avec la modélisation des systèmes pour mieux comprendre leurs fonctionnements et prédire leurs comportements ou leurs performances. La simulation

permet de valider la conception et la configuration de produits, des processus ou des systèmes (Mourtzis et al., 2015). Dans l'Industrie 4.0, un logiciel spécialisé (ex. Simio®, Arena®, FlexSim, etc.) peut être utilisé pour simuler le processus de production, décrivant ainsi toutes les configurations d'équipement, les interactions et les risques comme dans le monde réel. Cela réduit le temps de réglage des machines et augmente la qualité et l'efficacité des systèmes (Rodic, 2017). Reste que le choix de développer le meilleur type de modèle de simulation approprié pour représenter le système réel est une tâche multifactorielle et assez complexe (Mourtzis et al., 2015).

f) Internet des Objets et Internet des Services

L'Internet des Objets ou *Internet of Things* (IoT) est une technologie de communication qui utilise l'Internet pour connecter à tout moment différents objets dans des environnements physiques et virtuels (Sezer et al., 2018). Cela conduit à une décentralisation et à une prise de décision rapide. L'IoT utilise des technologies telles que les réseaux de capteurs sans fil, les intergiciels (middleware), les logiciels et les réseaux informatiques (Alcácer et Cruz-Machado, 2019). Dans l'architecture de l'IoT, la couche la plus courante dans un réseau typique, comprend quatre sous-couches principales, soient : la couche de détection pour détecter l'état des objets, la couche réseau pour prendre en charge les informations transférées via un réseau câblé ou sans fil à partir de la couche de détection vers la couche de service, la couche de service qui utilise une technologie intergiciel (middleware) supportant des services et des applications logicielles et la couche d'interfaçage pour faciliter l'interconnexion et la gestion des objets (Bekkali et al., 2021).

Si on remplace les objets physiques par des services, l'Internet des Services ou *Internet of Service* (IoS) est élaboré dans le sens où les services sont disponibles via Internet, afin que les utilisateurs ou les entreprises puissent créer, combiner et offrir un nouveau service à valeur ajoutée (Hofmann et Rüsçh, 2017). Grâce à la valeur ajoutée créée par le service, une position concurrentielle sur les marchés est créée pour les entreprises qui offrent la plus haute qualité de produits (Alcácer et Cruz-Machado, 2019).

L'IoT et l'IoS accroissent la qualité de l'environnement industriel en améliorant la mise au point d'un produit ou d'un service, en optimisant la valeur globale de la production et en réduisant les coûts de la main-d'œuvre et de la consommation d'énergie (Bavaresco et al., 2021).

g) Infonuagique

L'infonuagique ou le *Cloud Computing* permet d'accéder à divers serveurs qui fournissent une grande source de données. L'utilisateur peut obtenir des services évolutifs et compatibles à partir d'une source de données externalisée et illimitée selon ses besoins (De Rico, 2014). Dans l'Industrie 4.0, l'infonuagique permet le partage de données entre différents systèmes pour accéder à des données de production, de contrôle, de gestion, etc. L'adoption de l'infonuagique présente plusieurs avantages comme la réduction des coûts directs et indirects en supprimant une partie de l'infrastructure informatique dans l'entreprise (Branco et al., 2017). Les facteurs utilisés dans l'infonuagique sont les suivants : la plateforme en tant que service, l'infrastructure en tant que service, les centres de données (data centers) et les logiciels en tant que service (Alcácer et Cruz-Machado, 2019).

h) Cybersécurité

À l'ère de l'Industrie 4.0, où les machines sont connectées les unes aux autres à l'aide de protocoles intelligents, les types et l'ampleur des cyberattaques ont augmenté de façon exponentielle (MForesight et CCC, 2017). L'IoT, les environnements virtuels, l'accès à distance et les données stockées sur l'infonuagique sont menacés directement par les cyberattaques. Le risque devient une réalité, car les frontières physiques des entreprises disparaissent (He et al., 2016). L'utilisation de protocoles de sécurité est essentielle pour contrôler l'infrastructure d'une entreprise. La cybersécurité lors de l'intégration d'Internet à l'industrie doit être intégrée dans toutes les stratégies de l'entreprise, y compris la stratégie de production, la surveillance, la gestion des risques, etc. Pour améliorer la performance de l'ensemble de la chaîne de valeur de l'entreprise (Corallo et al., 2020). L'Industrie 4.0 a soulevé plusieurs stratégies en cybersécurité, comme l'architecture de

sécurité ou la sécurité par conception. En effet, les attaques, les menaces et les logiciels malveillants doivent être détectés automatiquement par les systèmes et sans intervention humaine (He et al., 2016). Plusieurs technologies peuvent aider à protéger les entreprises comme l'exemple du Virtual Private Network (VPN), Peer-to-Peer (P2P), Priority Information Report (PIR), Transport Layer Security (TLS), Domain Name System Security Extensions (DNSSE) et les étiquettes Radio Frequency Identification (RFID) (Weber et Weber, 2010).

i) Réalité augmentée

Avec l'aide des technologies avancées de la réalité augmentée (RA) (par exemple, ajouter la vision par ordinateur, incorporer des caméras de RA dans les applications de smartphone et la reconnaissance des objets), les informations sur l'environnement réel de l'utilisateur deviennent interactives. Les informations sur l'environnement et ses objets se superposent au monde réel. Ces informations peuvent être virtuelles ou réelles (Alama et al., 2017). La RA améliore la compréhension de la réalité par l'opérateur en utilisant des données artificielles sur l'environnement où le monde réel est défini par ses objets (Syberfeldt et al., 2016; Syberfeldt et al., 2015). Les caractéristiques de cette technologie peuvent être décrites comme suit : 1) la capacité de combiner des objets réels et virtuels dans un environnement réel, 2) la capacité de s'aligner avec des objets réels et virtuels et 3) la capacité d'interagir de manière interactive, en trois dimensions (3D) et en temps réel (Syberfeldt et al., 2016; Syberfeldt et al., 2015).

La RA s'applique à la fois aux activités externes (par exemple, l'engagement des clients et le marketing) et internes de l'entreprise (par exemple, la conception, la collaboration et l'efficacité des processus) (Rauschnabel et al., 2019; Mourtzis et al., 2017).

Les méthodes actuelles de création de contenu de la RA nécessitent une expertise complexe et variée, notamment la modélisation 3D, la programmation informatique et le traitement d'image (Bhattacharya et Winer, 2019; Van Lopik et al., 2019). Dans l'Industrie 4.0, la RA est utilisée pour aider à la conception, l'assemblage ou la maintenance.

j) Jumeau numérique

Le jumeau numérique est l'une des technologies de l'Industrie 4.0. Elle joint le système physique réel avec une représentation virtuelle correspondante utilisant un modèle, des capteurs, des données et un logiciel pour surveiller et analyser les données (Tao et Qi, 2019; Tao et Zhang, 2017). Un jumeau numérique est en effet une réplique numérique d'un objet, d'un processus ou d'un système qui peut être utilisé à diverses fins. Tao et Zhang (2017) ont souligné que le jumeau numérique est une méthode qui sert à réaliser une convergence entre les espaces physiques et virtuels. Le jumeau numérique joue un rôle important dans les opérations tout au long du cycle de vie du produit, y compris le concept, la conception du produit, la planification de la fabrication, la production, les ventes de produits, l'utilisation du produit, le service après-vente et le changement du produit (Melesse et al., 2019). En utilisant le jumeau numérique, associé à des algorithmes intelligents, les entreprises peuvent réaliser une surveillance et une optimisation des opérations basées sur les données, développer des produits et services innovants et diversifier la création de la valeur et les modèles d'affaires (Lu et al., 2019; Tao, et al., 2018). Le jumeau numérique associé à l'IA (apprentissage machine), à l'IoT et aux technologies de traitement des données jouent un grand rôle dans la transformation du paradigme de fabrication traditionnel vers une fabrication plus intelligente (Melesse et al., 2019). Le comportement d'un jumeau numérique est basé sur des données en temps quasi réel provenant de la contrepartie physique (réelle), mais la simulation se concentre sur ce qui pourrait se produire dans le monde réel (scénario hypothétique) et non sur ce qui se passe actuellement (Schleich et al., 2017).

k) Fabrication additive

La Fabrication additive (FA) est un processus de création d'une image tridimensionnelle d'un objet en utilisant le dépôt de matériaux tels que des polymères et des résines (Santos et al., 2020; Alcácer et Cruz-Machado, 2019). La capacité de la FA à obtenir des produits de forme presque pure, dans une courte durée, avec pratiquement aucun gaspillage de matière, est une révolution dans l'industrie. Avec la FA, des conceptions complexes

peuvent être réalisées en moins de temps et en réduisant les processus de production, ce qui se traduit par une réduction des coûts et des risques (Oliveira et al., 2020). Parmi les avantages de la fabrication additive, on peut mentionner (Mehrpuoya et al., 2021) :

- Personnalisation accrue sans outillage et sans coûts supplémentaires de fabrication;
- Fabrication de géométries complexes;
- Fabrication de pièces creuses (moins lourdes) ou de structures en treillis;
- Optimisation de l'utilisation des matériaux selon une approche zéro déchet.

1.2 Les petites et moyennes entreprises (PME)

Les PME peuvent être considérées comme le pilier de l'économie canadienne (Huang, 2020). Au Canada, une PME est définie par un nombre d'employés entre 1 et 499, et des actifs qui ne dépassent pas les 50 millions de dollars (Gouvernement du Canada, 2021).

Les PME sont reconnues par leur flexibilité et leur proximité avec les clients. Elles sont limitées en termes de capacité d'investissement et de performance opérationnelle. Aussi, elles utilisent souvent des stratégies à court terme, qui ne favorisent pas, nécessairement, des investissements à long terme (Moeuf et al., 2018).

Gélinas et al. (1996) ont décrit certaines des caractéristiques spécifiques de PME, à savoir :

- Gestion centralisée pour que le propriétaire soit le contrôleur principal;
- Procédures simples et flexibles et rétroaction immédiate;
- Environnement intime et interdépendance permanente entre les employés;
- Proximité des gestionnaires et travailleurs;
- Système d'information interne simple et sans formalité;

- Système d'information externe simple basé sur un contact direct avec les acteurs;
- Capacité rapide d'innover pour s'adapter au marché;
- Structure plate et à moindre coût;
- Accès rapide à l'information facilitant la consolidation de l'entreprise;
- Simplicité du processus de prise de décision;
- Plus autonome, peu mature et dépend des expériences et de l'expertise du propriétaire.

Selon le Gouvernement du Canada (2021), le Canada comptait 1,22 million d'entreprises, dont 1,2 million de petites entreprises (97,9 %), 22 725 de moyennes entreprises (1,9 %) et 2 936 de grandes entreprises (0,2 %). Au Québec, et d'après le même rapport, 97,7 % des entreprises sont des petites entreprises, 2 % sont des moyennes entreprises et 0,3 % sont des grandes entreprises.

Selon les mêmes statistiques, entre 2014 et 2018, le nombre moyen annuel de naissances de PME s'est élevé à 97 640.

En 2020, les entreprises du secteur privé employaient un peu plus de 11,4 millions de personnes au Canada. La majorité de ces employés travaillaient pour de petites entreprises, soit 67,7 % (7,7 millions) de la main-d'œuvre du secteur privé comparativement à 20,6 % (2,3 millions) pour les moyennes entreprises et à 11,7 % (1.3 million) pour les grandes entreprises. Au total, les PME employaient 88,3 % de la main-d'œuvre du secteur privé (10 millions de personnes) et de ce nombre, 86,1 % étaient des PME dans le secteur privé au Québec. Ce qui témoigne du rôle important qu'elles jouent dans l'emploi des Canadiens. La statistique de la distribution de l'emploi des entreprises en 2020 selon leur taille est mentionnée dans la Figure 1.2 (Gouvernement du Canada, 2021) :

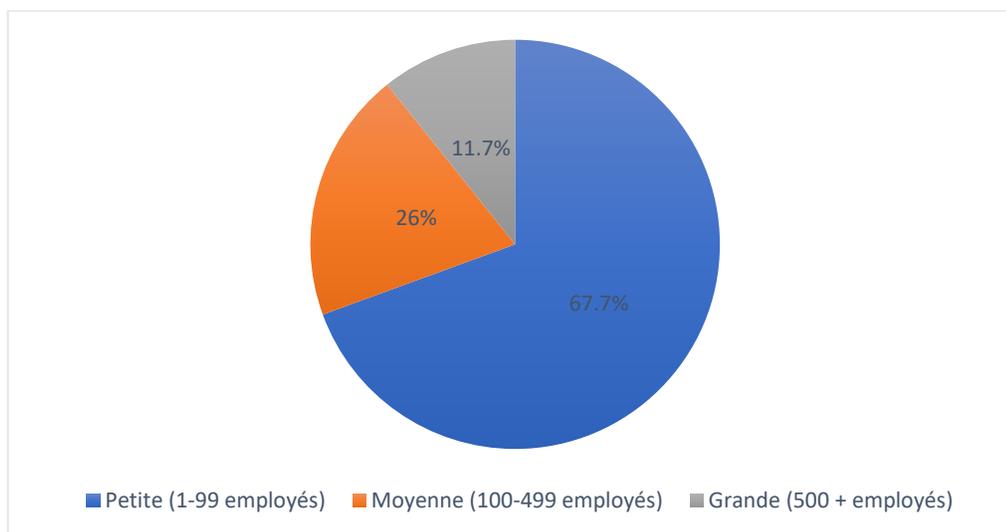


Figure 1.2 Distribution de l'emploi des entreprises du secteur privé selon la taille de l'entreprise, 2020 (Gouvernement du Canada, 2021)

1.2.1 Industrie 4.0 en contexte de PME

L'industrie est confrontée à des défis économiques importants en raison d'un rythme de développement sociétal et technologique rapide (Hébert et Moudallal, 2016). Ces défis incluent l'épuisement des ressources naturelles, l'augmentation des prix de l'énergie, le vieillissement de la main-d'œuvre, la mondialisation et l'évolution des systèmes de production (Ganzarain et Errasti, 2016).

Des utilisateurs exigent des produits et des services innovants ainsi qu'un support immédiat. Cela nécessite une grande agilité commerciale pour faire face aux concurrents et créer de la valeur. Par conséquent, les PME doivent être flexibles pour s'adapter à un environnement dynamique, imprévisible et chaotique et avoir une structure agile tout au long du cycle de vie du produit (Ganzarain et Errasti, 2016).

Les PME représentent un élément essentiel dans l'économie de la plupart des pays du monde (Amaral et al., 2019). Ils doivent suivre la tendance pour rester compétitifs (Issa et al., 2017). À compétitives l'heure actuelle, la numérisation des processus entraîne des

changements dans les modèles d'affaires et représente un levier dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement (CEFRIO, 2016). Les PME sont considérées comme des innovateurs en raison de leurs structures organisationnelles simples et flexibles en comparaison aux grandes entreprises (Müller et al., 2020). Bien que les PME ne disposent pas d'importantes ressources financières (en comparaison avec les grandes entreprises) et qu'elles n'ont pas une grande capacité en termes de capital humain (pour conceptualiser de nouvelles connaissances), elles peuvent quand même bénéficier des avantages de l'Industrie 4.0 (Müller et al., 2020). Ces PME peuvent profiter de solutions développées ailleurs ou appliquées dans d'autres entreprises afin de migrer vers l'Industrie 4.0 (Torn et Vaneker, 2019).

L'utilisation des nouvelles technologies, telles que les systèmes avancés de fabrication, l'IoT et la FA, constitue un levier majeur pour les PME manufacturières (Kolla et al., 2019; Torn et Vaneker, 2019). Avec l'utilisation de ces technologies, de nombreuses opportunités se manifestent pour ces PME. En intégrant des systèmes intelligents (capables d'apprendre, de reconnaître et de réagir), la production des PME aura un avantage concurrentiel. En effet, avec la connectivité et l'interaction entre les processus, les machines et les travailleurs, le système de production devient 30 % plus rapide et 25 % plus efficace et renforce ainsi la personnalisation de masse (Ganzarain et Errasti, 2016). Les PME doivent changer rapidement leurs processus en fonction de la demande et des besoins des clients (personnalisation des produits). Pour maintenir la compétitivité, tous les acteurs de la chaîne d'approvisionnement, de la production et de la distribution doivent collaborer (MEIQ, 2019). Ainsi, l'Industrie 4.0 va changer la conception, la fabrication, l'exploitation et le service concernant les produits et les systèmes de production des PME (Ganzarain et Errasti, 2016).

Les PME restent au centre de l'initiative gouvernementale de la transformation numérique (CEFRIO, 2016). Les PME sont toujours incapables de découvrir et de développer des stratégies efficaces lors de leur migration vers l'Industrie 4.0 (Hébert et Moudallal, 2016). Elles n'ont pas suffisamment de connaissances pour choisir et intégrer les technologies

existantes en fonction de leurs stratégies d'entreprise et l'incertitude du résultat pousse la plupart des dirigeants d'entreprise à résister à ces changements fondamentaux (Wienbruch et al., 2018).

De nombreuses PME ne connaissent pas la voie vers l'Industrie 4.0 et font face à de nombreux défis tels que le manque de connaissances et de sensibilisation, de ressources financières et d'expertise (Amaral et al., 2019). La plupart de celles-ci ne disposent pas de données fiables qui vont servir dans l'implantation de plusieurs technologies de l'Industrie 4.0 (Moeuf et al., 2018). Les PME qui s'intéressent à l'Industrie 4.0 ne sont pas très convaincues, puisqu'elles constatent que leurs infrastructures actuelles offrent toujours un meilleur rapport coûts-avantages que l'acquisition et l'utilisation de nouvelles technologies assez dispendieuses (Müller et al., 2020).

1.2.2 Migration des PME vers l'Industrie 4.0

Au début, les PME doivent analyser les risques de chacun des changements qui touchent leur processus. Il s'agit d'une étape importante qui peut décider du succès du changement (Kaassis et Badri, 2018; Tremblay et Badri, 2018). Les PME doivent examiner les risques et les incertitudes liés aux changements. Le choix des mesures préventives pour réduire et contrôler les risques est une étape importante de la gestion des risques. La gestion des risques consiste à comparer la situation actuelle et les menaces potentielles des nouvelles technologies (Kaassis et Badri, 2018; Tremblay et Badri, 2018). L'utilisation de ces technologies sans précautions met les entreprises en danger (Vrchota et al., 2019; Badri et al., 2018).

Les premières PME à adopter l'Industrie 4.0 pourraient devenir un modèle à suivre pour les autres entreprises qui souhaitent faire la même chose. Ces entreprises peuvent bénéficier de leurs expertises en la matière pour offrir une variété de conseils. La migration vers l'Industrie 4.0 (ou transition vers l'Industrie 4.0 ou transformation numérique) fonctionne mieux lorsque les entreprises sont capables de gérer efficacement la production au travers d'une chaîne d'approvisionnement bien contrôlée (Müller et al., 2020).

Les compétences numériques sont un élément important pour migrer vers l'Industrie 4.0. Ces compétences représentent, essentiellement, une combinaison de trois caractéristiques individuelles : les connaissances, les compétences et l'attitude envers la technologie et la société. La combinaison de ces caractéristiques est utilisée pour examiner les problèmes de l'entreprise et créer une source d'information solide (CEFRIIO, 2016). Les compétences numériques sont à la fois techniques et analytiques. Développer et améliorer le niveau de ces compétences est une condition préalable à la migration vers l'Industrie 4.0. Les gestionnaires du projet de migration doivent se servir des compétences diversifiées de plusieurs membres de l'équipe (Figure 1.3).

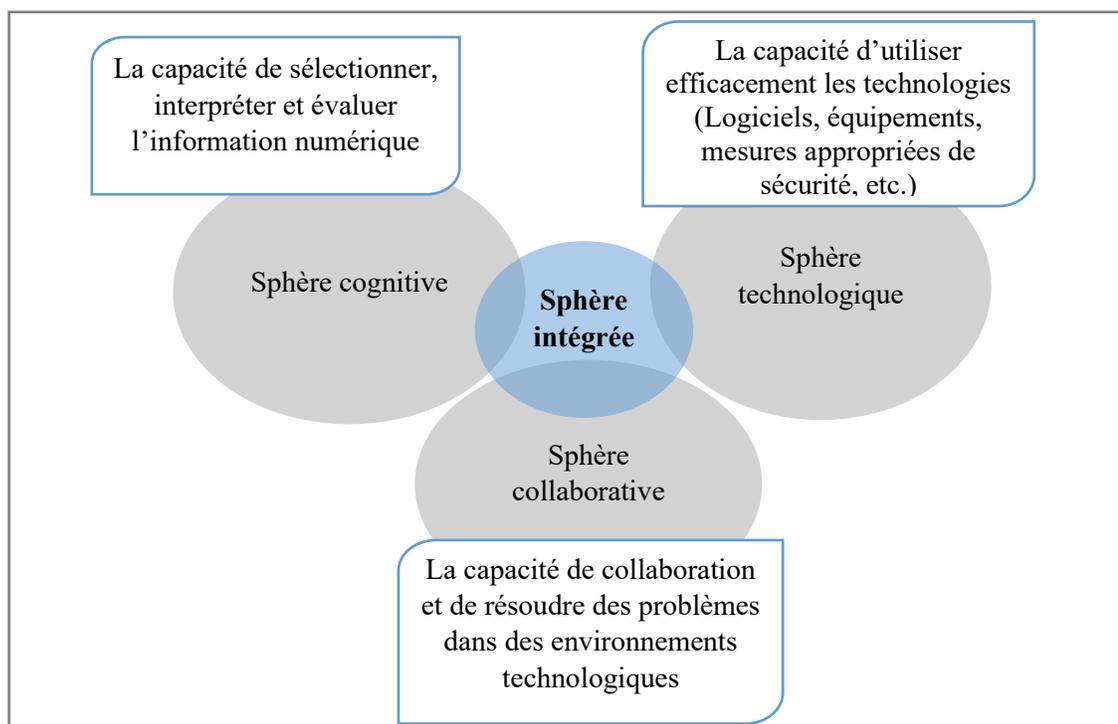


Figure 1.3 Le modèle des compétences numériques (CEFRIIO, 2016)

Les PME doivent suivre les changements qui touchent le milieu industriel pour rester compétitifs. Le développement des produits intelligents offre d'innombrables opportunités pour améliorer leurs performances. Le premier réflexe des entreprises est de

se concentrer sur les technologies requises, alors qu'il faut d'abord préparer une plateforme adaptée aux perspectives sociales et cognitives, puis de traiter les aspects organisationnels, techniques et humains (Hobscheidt et al., 2019). Le défi majeur est d'identifier les besoins réels de l'entreprise et de créer des processus et des produits intelligents qui y correspondent. Hobscheidt et al. (2019) proposent une méthodologie à trois étapes pour développer des produits intelligents, à savoir :

- Analyse de la demande : Tout d'abord, la situation réelle de l'entreprise est analysée. Les exigences des clients et du personnel, les produits et services fournis doivent être soigneusement examinés. Le facteur décisif dans le développement et la performance des produits intelligents est la focalisation appropriée sur les demandes individuelles des entreprises;
- Identification des modèles de solutions : L'objectif principal est d'identifier les modèles de solution appropriés. Les connaissances existantes sur les produits intelligents constituent la base du développement des modèles. Le résultat de cette étape est de proposer un modèle recommandé;
- Spécification du modèle : À l'étape finale, le modèle sélectionné est spécifié et le produit intelligent est conceptualisé à l'aide du modèle d'échantillon. La fabrication intelligente est mise en œuvre en créant une feuille de route.

1.3 Régime québécois de santé et de sécurité du travail

La première loi québécoise traitant de la protection des travailleurs a été adoptée par l'Acte des manufactures de Québec en 1885. Dans les années 1928, la Loi sur les accidents du travail (LAT) a été adoptée et, la même année, la Commission des accidents du travail (CAT) a été créée. La LAT ne comprend aucune mesure de prévention ni réadaptation après une lésion (CSST, 2011).

En 1979, l'Assemblée nationale du Québec a adopté la Loi sur la santé et la sécurité au travail (LSST) et la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST) a vu le jour

pour remplacer la CAT (Bérubé, 2004). La LSST a été créée afin d'élimination à la source des dangers sur la santé, la sécurité et l'intégrité physique des travailleurs (Gouvernement du Québec, 2021c). La LSST constitue un minimum en prévention. Les textes parfois flous de la LSST incitent les entreprises à l'interpréter de plusieurs manières. Le faible niveau de mise en œuvre de système de gestion de la SST par les entreprises nécessite l'existence d'un outil obligatoire, mais l'absence d'un outil unique pour les entreprises complique la tâche et crée des incohérences (Ndjoulou, 2018).

Les obligations des employeurs sont fixées par le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) (Gouvernement du Québec, 2021a) et puis, en 1985, par la Loi sur les accidents de travail et les maladies professionnelles (LATMP) (Gouvernement du Québec, 2016b). En 2016, la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) a été créée en fusionnant les trois commissions : la CSST, la Commission des normes du travail (CNT) et la Commission de l'équité salariale (CES). La mission de la CNESST est de promouvoir les droits et les obligations de SST et de s'assurer qu'ils sont respectés par les gestionnaires et travailleurs. La CNESST fixe des obligations de SST et impose des programmes de prévention applicables selon le secteur et la taille de l'entreprise.

Une politique de SST est une stratégie reliée au développement, à la promotion et au maintien d'un environnement de travail qui protège la santé mentale, physique et émotionnelle des travailleurs contre les dangers réels ou potentiels. La politique intervient également pour prévenir et anticiper les dangers avant qu'ils ne surviennent et pour informer les travailleurs (Nyirenda et al., 2015). La SST est une préoccupation dans l'industrie. Les exigences en SST sont aujourd'hui essentielles dans la plupart des métiers dans le but de prévenir les dangers (BSI, 2007). Une mauvaise prise en compte de la SST entraîne des risques de blessures et de décès pour les travailleurs, des problèmes sociaux dus à l'absence de mesures préventives et des problèmes économiques (Ndjoulou, 2018). En raison de la gravité élevée des blessures, il est nécessaire d'améliorer les mécanismes de sécurité et de santé.

La LSST a défini quatre types de mécanismes de prévention (Ndjoulou, 2018; Baril-Gingras et al., 2010) : le programme de prévention (PP), les services de santé au travail, le Comité de SST (CSS), le Représentant à la prévention (RP). Les deux premiers sont utilisés pour évaluer les dangers sur le lieu de travail et choisir les actions pour éliminer ces dangers à la source. Les autres mécanismes, qui sont le CSS et le RP, encouragent la participation des travailleurs dans la prévention. Ces mécanismes devaient être mis en vigueur selon les indices de risque ou les groupes prioritaires (CNESST, 2010).

Le Tableau 1.2 explique le rôle des intervenants en SST au Québec et leurs mandats visant la mise en œuvre d'une gestion de la SST dans les entreprises selon leurs secteurs d'activité et leurs tailles.

Tableau 1.2 Les intervenants en SST et leurs mandats (Adapté de Bérubé, 2004)

Intervenants SST	Mandats
Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST)	Prévention, inspection, financement, réadaptation, retour au travail et indemnisation
Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST)	Recherche scientifique et services de laboratoire
Associations sectorielles paritaires (ASP)	Formation, information, et conseil et assistance technique
Bureau d'évaluation médicale (BEM) du Tribunal administratif du travail (TAT)	Évaluation médicale et règlement des différends
Réseau de la santé et des services sociaux	Services de santé au travail et programmes de santé spécifiques
Spécialiste en prévention ou Professionnel en SST	Prévention, coordination, gestion et conseil
Comité de santé et de sécurité (CSS) et Représentant à la prévention (RP)	Accompagnement et support en prévention

L'élimination de l'obligation des petites entreprises de moins de 20 travailleurs de mettre en œuvre le PP crée des ambiguïtés dans la gestion des risques de SST et la précision des obligations des parties (Baril-Gingras et al., 2010). Dans ce cas, l'absence de besoin de CSS, l'absence des activités de prévention et d'externalisation, augmente les risques de

SST dans les petites entreprises, ce qui conduit à des taux d'accidents du travail élevés (Baril-Gingras et al., 2010).

Aujourd'hui, les problèmes de SST au Québec sont toujours non négligeables et, dans plusieurs cas, croissants. Les dangers connus ne sont pas encore suffisamment maîtrisés et de nouveaux dangers apparaissent constamment à mesure que les processus et les procédés de production changent. La méconnaissance des risques émergents peut entraîner des conséquences physiques, psychologiques, humaines, familiales, sociales et économiques (Ndjoulou, 2018). La numérisation de la production crée de nouvelles opportunités, mais aussi apporte de nouveaux problèmes de SST, comme les troubles posturaux, le stress, etc. (EU-OSHA, 2015). Il est donc essentiel d'identifier les conséquences de la mise en place des technologies 4.0 sur la SST avant de les mettre en place dans le but d'éliminer leurs effets à la source.

Étant donné les dangers souvent mal connus des technologies 4.0, la prise en compte de leurs effets sur la SST est primordiale pour réduire les lésions professionnelles.

Dans la section suivante, nous vérifierons les opportunités et les menaces de chacune des technologies évoquées précédemment.

1.3.1 PME manufacturière à l'ère de l'Industrie 4.0

Depuis toujours, l'industrie manufacturière québécoise se caractérise par l'omniprésence des PME. L'un des principaux défis pour les PME manufacturières québécoises est la transformation numérique (Hébert et Moudallal, 2016). L'Industrie 4.0 est une opportunité pour les PME manufacturières québécoises de se développer et elle constitue pour elles un avantage concurrentiel. Cependant, la transformation numérique ne se fait pas en une journée et les entreprises doivent se préparer progressivement pour l'adapter (STIQ, 2020). L'Industrie 4.0 peut affecter les entreprises manufacturières de plusieurs façons. Elle peut changer les modèles d'affaires et les chaînes de valeur en connectant des systèmes intégrés et des processus de production intelligents (Kolla et al., 2019). Par conséquent, il est important de connaître les composants de base qui affectent l'ensemble

de la chaîne de valeur des entreprises manufacturières. Dans le contexte de l'Industrie 4.0, l'Internet et les technologies de l'information sont très importants. Lors de l'implémentation, toutes les sources d'informations dans les processus de l'entreprise sont connectées les unes aux autres pour pouvoir centraliser et partager des données (Schuh et al., 2017). Il est très important pour les manufacturiers d'identifier les moyens pour franchir de nouvelles limites dans la création de valeur. Ils doivent comprendre les changements apportés par l'Industrie 4.0 et accroître leur connaissance de la façon dont ces changements s'intègrent dans leurs modèles d'affaires. Le cycle de vie court des produits, ainsi que leur grande variété nécessitent une agilité et une flexibilité dans le système de production, c'est pourquoi les fabricants cherchent l'agilité dans leurs produits (Hamzeh et al., 2018).

Pour les entreprises manufacturières, la fabrication agile et opérationnelle devient pertinente, car elle permet aux entreprises de s'adapter aux changements imprévisibles du marché et aux environnements dynamiques et de répondre rapidement aux besoins de leurs clients (Essakly et al., 2019; CEFRIO, 2016). L'Industrie 4.0 crée l'agilité dans une usine. En effet, lorsque les produits intelligents disposent de plus d'informations en temps réel sur leurs fonctionnalités, la production s'accélère tout au long du processus. En offrant un faible coût, une meilleure qualité et un niveau de service client supérieur, l'Industrie 4.0 fait des manufacturiers de fournisseurs privilégiés pour les clients potentiels et actuels (Khan et Turowski, 2016).

Certaines méthodes et outils numériques peuvent accélérer la transition numérique des entreprises et les composants qui affectent la performance numérique peuvent varier selon le type d'entreprise, le segment d'activité et le type de produit (Gamache et al., 2019).

De nos jours, la plupart des secteurs industriels utilisent des logiciels numériques moins chers et moins complexes, tels que les logiciels de conception et de gestion, les suites bureautiques et les réseaux sociaux. Des systèmes plus avancés tels que l'intelligence artificielle, les systèmes de gestion de production, les cobots et la gestion de la relation client sont utilisés dans moins de 18 % des cas (Bourget et al., 2017).

Pour ces entreprises, augmenter la productivité des ressources humaines et l'efficacité des technologies utilisées est un moyen efficace pour réduire les coûts (Pinto et al., 2019). Le budget initial nécessaire pour migrer vers l'Industrie 4.0 dans les entreprises est assez élevé, mais en créant de l'intelligence dans les processus et les produits, les coûts seront amortis. La réduction des coûts de production et d'exploitation est la principale motivation des manufacturiers pour migrer vers l'Industrie 4.0 (Horváth et Szabó, 2019).

Les résultats des études menées par Gamache et al. (2017) montrent que la plupart des PME manufacturières au Québec n'acceptent pas la migration vers l'Industrie 4.0. De nombreux facteurs tels que le manque de ressources financières, les problèmes de gestion, l'utilisation d'anciens équipements ou d'outils de planification représentent des obstacles dans la transition vers l'Industrie 4.0. Plusieurs conditions nécessaires sont détaillées pour réussir la transformation numérique des PME manufacturières (STIQ, 2020) :

- L'engagement de la direction;
- Le développement d'une culture numérique;
- La sensibilisation des collaborateurs et des gestionnaires et leur formation;
- La clarification des avantages et de l'importance de l'Industrie 4.0 pour l'entreprise et les travailleurs;
- L'utilisation des ressources diversifiées et spécialisées et les outils et les programmes de transformation existant d'accompagnement des entreprises dans leur processus de transformation numérique (notamment le Plan québécois de production des investissements et la Vitrine 4.0 du gouvernement du Québec);
- L'investissement dans les ressources humaines, matérielles, financières et technologiques.

Le Tableau 1.3 suivant précise les composantes 4.0 utilisées durant la transformation numérique qui peuvent remédier aux lacunes des PME.

Tableau 1.3 Caractéristiques d'une PME manufacturière ayant des composantes 4.0
(Adapté de Kolla et al., 2019)

Limitation d'une PME	Composantes 4.0
Manque de capacité à fabriquer des produits personnalisés	Modèles de simulation
	Équipements intelligents
Manque d'intégration des TIC	Intégration verticale du réseau à l'échelle de l'entreprise. Par exemple, Planification des ressources d'entreprise, planification, prévision et réapprovisionnement collaboratif
Manque de technologies de fabrication avancées (TFA)	Communication machine à machine
	Interface personne-machine
Relation étroite avec les clients	Intégration horizontale des réseaux de valeur. Par exemple : infrastructure TIC pour la planification et le contrôle de la logistique
Ignorance des normes et décentralisation des processus	Intégration horizontale et verticale de tous les systèmes sociotechniques de l'entreprise
Écart dans la prise de décision stratégique	Analyse approfondie en se servant du Big Data
	Planification stratégique et mise en place d'outils numériques
Absence d'un réseau de collaboration solide	Intégration horizontale des réseaux de valeur

Tableau 1.3 Caractéristiques d'une PME manufacturière ayant des composantes 4.0
(Adapté de Kolla et al., 2019) (suite)

Limitation d'une PME	Composantes 4.0
Manque de qualification diversifiée des employés, de mentorat, de formation ciblée et de supervision individuelle	Formation sur les capteurs intelligents, les technologies numériques et l'analyse des données, etc.
Résistance au changement, manque de culture d'innovation et absence de culture organisationnelle	Engagement de la direction et plan de transformation holistique à long terme.

1.3.2 Santé et de sécurité du travail en contexte de PME

La majorité des travaux élaborés sur la SST se concentrent sur les risques spécifiques des grandes entreprises, alors que les PME jouent un rôle important dans l'économie. Le nombre de lésions professionnelles dans les PME est plus élevé que celui dans les grandes entreprises (Micheli et Cagno, 2010). Elles ont une compréhension limitée des risques reliés au travail (MacEachen et al., 2010). Les obstacles à la mise en œuvre d'interventions en SST dans les PME gravitent alentour de trois axes : la réglementation, les ressources et l'information (Badri et al., 2018). Les obstacles se concentrent principalement sur les étapes de conception et de mise en œuvre puisque la conception et la mise en œuvre des interventions sont celles qui prennent le plus de temps et de ressources, et les erreurs qui peuvent survenir lors de la conception ou de la mise en œuvre d'une intervention ne sont comprises que lors de l'évaluation (Masi et Cagno, 2015).

De faibles taux de lésions professionnelles dans les PME n'attirent pas l'attention de la direction sur la sécurité et cela pourrait réduire la perception du risque, modifier les approches de gestion des risques et changer les priorités de gestion (Cagno et al., 2013).

Le manque de connaissance des règles et approches de SST dans les PME est dû au manque de programmes de formation complets, souvent existants dans les grandes entreprises (MacEachen et al., 2010). La difficulté d'une prise en charge de la SST est attribuée au manque de ressources technologiques, financières et humaines (Cagno et al., 2011). Le manque de ressources dans certains cas est attribué à des contraintes budgétaires qui poussent les gestionnaires à effectuer toutes les tâches de gestion, y compris la SST, pour laquelle ils manquent d'expertise (Nyirenda et al., 2015).

Les coûts de la SST totalisent les coûts de prévention et les coûts des lésions. *L'American Society of Safety Engineers* (ASSE) conseille aux entreprises de mettre la SST en priorité dans le cadre de leurs stratégies d'affaires et viser ainsi la réduction des lésions professionnelles afin d'accroître leur rentabilité et réinvestir dans de nouveaux marchés (Bayram et al., 2016).

Les PME fonctionnent sous des contraintes budgétaires très strictes et l'investissement dans la SST n'est pas attrayant parce que les avantages et les retombées économiques d'un tel investissement sont majoritairement à long terme. L'accent mis sur cet investissement est souvent négligé (Hasle et Limborg, 2006). Si ces avantages financiers sont reconnus pour les PME, la prise de conscience de la nécessité de la prévention certainement accroîtra. Ces entreprises sont souvent incapables d'embaucher des employés ayant des connaissances spécialisées en SST et ils préfèrent consacrer leur budget à un processus rentable à moyen et à court terme (Legg et al., 2009).

Dans certains cas, l'employeur comprend les conséquences de violation de la réglementation en SST, mais justifie le non-respect sur la base d'une survie économique. Par conséquent, des incitations économiques et des programmes de soutien sont nécessaires pour améliorer les pratiques de SST dans les PME (EU-OSHA, 2021). Réduire le fossé entre les travailleurs et les employeurs et bonifier les relations sociales améliorent la perception des risques professionnels (Eakin et MacEachen, 1998). La compréhension de ces enjeux joue un rôle important dans la conception efficace des initiatives de prévention et de gestion des risques.

Dans de nombreux domaines, les PME bénéficient d'exemptions en matière de SST. Ces exemptions réduisent l'intérêt des PME quant aux dangers professionnels et le besoin à des experts en SST. La plupart des PME recourent à la sous-traitance pour diverses raisons, notamment la réduction des coûts, la réduction des risques, la concentration sur l'activité principale de l'entreprise, etc. (Legg et al., 2015). La sous-traitance et les conditions contractuelles complexes peuvent compliquer les responsabilités professionnelles en matière de SST. Les interventions de SST dépendent non seulement des caractéristiques des PME telles que l'expérience, le type d'industrie, la taille de l'entreprise, etc., mais également des caractéristiques de l'entreprise sous-traitante (MacEachen et al., 2010). Les principaux intervenants qui influencent l'intervention de la SST dans les PME sont les clients, les agences de placement, les professionnels de la SST, les compagnies d'assurance, les fournisseurs, les syndicats, les chambres de commerce et les établissements de formation professionnelle (Legg et al., 2015).

Afin d'élaborer des stratégies et des politiques efficaces pour l'utilisation de la SST, on doit avoir une bonne compréhension de l'entreprise et de la culture organisationnelle et être en mesure d'identifier les besoins et objectifs spécifiques des PME (Eakin et al., 2000). Les stratégies des PME en gestion de la SST souffrent de plusieurs contraintes, dont les ressources limitées (MacEachen et al., 2010). Plus précisément, les facteurs suivants peuvent être mentionnés comme les principaux facteurs influençant la gestion de la SST dans les PME (Legg et al., 2015) : le faible niveau de compétences managériales, le manque de travailleurs qualifiés, le manque de ressources financières et de temps, le fardeau de la conformité aux réglementations et aux normes, l'absence de communication efficace avec les autorités, l'augmentation des coûts de recours à des consultants en SST, la complexité des relations intra organisationnelles, les difficultés dans la gestion efficace des activités de sous-traitance (Legg et al., 2015; Masi et Cagno, 2015).

1.3.3 Influence potentielle de l'Industrie 4.0 sur la SST

Cette section examine les opportunités et les menaces sur la SST de l'utilisation des groupes technologiques de l'Industrie 4.0. Le résultat final sera présenté sous forme d'un portrait préliminaire et théorique l'influence de l'Industrie 4.0 sur la SST en se basant sur la littérature.

a) Méga-données

Collecter de grandes quantités de données en temps réel et les combiner avec les données historiques du système conduira à des décisions plus précises en temps réel et aura un impact positif sur les performances, la sécurité et la stabilité du système (Vogl et al., 2016). Les méga-données posent de grands défis et risques en matière de confidentialité et de sécurité à cause de leur grand volume, de leur diversité et de la dispersion de leurs sources. Les cyberattaques constituent l'une des menaces les plus importantes pour le travail (Zhaohao et al., 2018).

Les cyberattaques contre les systèmes de contrôle et d'automatisation industrielle, en raison de la nature dangereuse des processus et des matériaux existants, peuvent entraîner des conséquences néfastes et des dommages physiques (Turk et al., 2021).

D'autre part, les cyberattaques peuvent entraîner la perte d'informations et un accès non autorisé à celles-ci. L'accès aux documents propres aux systèmes de gestion, y compris les informations sensibles sur les emplois ainsi que les données personnelles sur les employés et les personnes affiliées à l'entreprise, peut causer des problèmes financiers et sociaux (Turk et al., 2021).

Les données non structurées collectées par les capteurs IoT sont stockées dans de grandes bases de données et traitées en temps réel. Les cyberattaques menacent non seulement les données IoT, mais également les données stockées. Ces menaces entraînent des conséquences similaires, telles que des dommages aux biens physiques, des problèmes de sécurité et des troubles psychologiques (Agrafiotis et al., 2018).

Compte tenu de la grande quantité de données, il est important d'identifier les données pertinentes, les interpréter et les acheminer correctement. Les décisions fondées sur des données incomplètes et inexactes ou sur des interprétations erronées de ces données entraînent des conséquences sur la SST (Badri et al., 2018; Cole et al., 2015).

L'absence de normes ou de réglementations appropriées et l'absence de mise à jour de ces lois ainsi que les changements technologiques peuvent créer des problèmes de SST (Badri et al., 2018).

b) Intelligence artificielle

L'IA peut créer de nouvelles opportunités ainsi que des défis pour la SST, la gestion et la réglementation (Yang et al., 2021).

Avec l'utilisation croissante de l'IA, les systèmes automatisés effectuent non seulement des tâches physiques, mais également une variété de tâches cognitives. À l'aide de programmes basés sur l'IA sur le lieu de travail, le contenu des emplois et des tâches change et de nouveaux défis sont créés pour la SST (EU-OSHA, 2021). Compte tenu des avantages potentiels des programmes d'IA pour la SST, les professionnels de la SST doivent s'efforcer de minimiser les défis potentiels de cette technologie (Howard, 2019).

Les capteurs d'intelligence artificielle peuvent offrir les avantages d'une formation en sécurité et santé au travail et des défis potentiels. (Howard, 2019). Ces capteurs d'intelligence artificielle, comme les technologies portables, collectent des informations pour aider à identifier les situations dangereuses pour les humains. Ils sont également utilisés pour prévenir et réduire les risques pour la sécurité (Abioye et al., 2021). L'IA aide à apprendre et à reconnaître rapidement les risques et à prendre des décisions en temps réel (Badri et al., 2018).

En revanche, s'ils sont défectueux et instables, ils peuvent créer des risques de la SST (Abioye et al., 2021; Moore, 2019).

Une formation en réalité virtuelle basée sur l'IA, peut être utilisée pour créer des environnements dynamiques afin de simuler des situations dangereuses et d'augmenter les capacités de détection des risques des travailleurs (Howard, 2019). De plus, l'IA est utilisée dans les cobots pour améliorer la collaboration homme-robot, réduire les tâches routinières et améliorer l'ergonomie (Peres et al., 2020). Cependant, la présence d'un cobot et d'un travailleur humain dans une zone de travail soulève divers problèmes de SST, comme le contrôle des collisions et les effets négatifs potentiels sur la sécurité et la santé des travailleurs, en particulier sur leur santé mentale (EU-OSHA, 2021; Howard, 2019).

Les interactions homme-machine doivent également être prises en compte lors de l'utilisation de l'intelligence artificielle en milieu de travail. Des conséquences négatives peuvent survenir lorsque les humains ne comprennent pas pleinement les commandes du système (Howard, 2019; Merayo et al., 2019). De plus, les applications d'IA peuvent être utilisées pour extraire des connaissances à partir de données afin de prendre des décisions, en utilisant des systèmes d'aide à la décision qui aident les humains à trouver des informations et à faire des choix éclairés (Howard, 2019).

Les algorithmes d'IA sont capables de prendre des décisions sur des problèmes complexes (Abioye et al., 2021; Ribeiro et al., 2021). Cependant, des décisions inappropriées peuvent entraîner des conséquences importantes sur la SST (Bousdekis et al., 2020; Howard, 2019). Si l'IA n'est pas guidée par des directives définies par l'homme lors de la prise de décision, elle peut ne pas fonctionner correctement (Merayo et al., 2019).

Selon Moore (2019), la technologie en elle-même ne crée pas intrinsèquement d'avantages ou de risques pour les travailleurs. C'est la mise en œuvre de la technologie qui peut entraîner des conséquences positives ou négatives. Les technologies numériques basées sur l'IA, comme le souligne l'EU-OSHA (2021), facilitent la surveillance et la gestion en collectant de grandes quantités de données en temps réel sur les travailleurs.

Cette technologie peut avoir des implications à la fois positives et négatives. D'une part, elle permet une évaluation avancée des risques, des inspections efficaces et une orientation

en temps réel pour les travailleurs, améliorant ainsi la santé mentale des travailleurs. D'autre part, les processus décisionnels algorithmiques dans l'IA, comme le note Moore (2019), ne tiennent pas compte des interventions humaines et des considérations éthiques, exposant les travailleurs à des risques et des stress structurels, physiques et psychologiques.

Les risques de stress et d'anxiété en matière de SST surviennent lorsque les travailleurs ont le sentiment que les décisions de gestion sont prises sur la base de données auxquelles ils n'ont pas accès (EU-OSHA, 2021; Bousdekis et al., 2020). Si l'analyse individuelle des données conduit à une restructuration du lieu de travail, à des récompenses ou des pénalités, à des remplacements d'emplois ou à des changements des descriptions de poste, cela est susceptible de causer de l'insécurité et du stress liés au travail (EU-OSHA, 2021; Moore, 2019).

Une surveillance excessive du comportement et des performances des travailleurs peut entraîner de l'anxiété et du stress en raison de l'atteintes à la vie privée, d'accidents et de problèmes de santé tels que des troubles musculosquelettiques et les maladies cardiovasculaires découlant des efforts visant à améliorer les performances et à intensifier les tâches (EU-OSHA, 2021; Moore, 2019).

Les facteurs pouvant causer des problèmes de santé dans le domaine de l'IA industrielle sont les suivants :

- **Qualité des données :** La disponibilité de grands ensembles de données ainsi que leur réutilisation est très importante (Bousdekis et al., 2020). Des conséquences physiques et SST se produiront si des ensembles de données incorrects ou insuffisants sont utilisés et conduisent à des décisions erronées (Sunarti et al., 2021; Bousdekis et al., 2020; Badri et al., 2018; Lee et al., 2018).
- **Des modèles équitables pour l'IA :** la mise en œuvre de modèles et d'algorithmes de haute précision est plus importante que les données. La

précision des algorithmes d'IA et d'apprentissage automatique est directement liée à la quantité de données utilisées pour les enseigner (Aoun et al., 2021). Les modèles doivent être fiables et peuvent être réutilisés en se connectant à une source de données (Peres et al., 2020). Par conséquent, le partage de données entre différentes applications est essentiel pour améliorer la précision de ces algorithmes. (Aoun et al., 2021; Peres et al., 2020). Les algorithmes de l'IA ne peuvent apprendre qu'à partir de données préexistantes (Moore, 2019). Si la conception d'algorithmes artificiels conduit aux biais de données, ça montra une faiblesse de l'intelligence artificielle (Moore, 2019). Des biais algorithmiques possibles peuvent conduire à des systèmes de décision malveillants (Galaz et al., 2021).

- **Cyber infrastructure** : L'utilisation de l'IA rend important le besoin d'infrastructures appropriées pour assurer le niveau de qualité, de sécurité et de fiabilité des données (Lee et al., 2018). Les mécanismes de cybersécurité et de confidentialité sont très importants dans l'industrie (Peres et al., 2020). L'IA dans le domaine des cyberattaques a des effets à la fois mauvais et bons (Vaio et al., 2021). L'IA augmente le risque de faciliter l'intensification des attaques dans le système (Abioye et al., 2021). Les cyberattaques entraînent également des effets psychologiques majeurs chez les individus, entraînant frustration, stress et anxiété (Vaio et al., 2021). D'autre part, l'IA a conduit à une augmentation de l'utilisation de l'apprentissage automatique pour effectuer des analyses de logiciels malveillants ainsi que la détection d'anomalies du réseau, ce qui est une activité efficace pour réduire l'impact des cyberattaques (Alhayani et al., 2021).

L'avènement de l'intelligence artificielle a entraîné des changements dans les caractéristiques décisionnelles de certaines des règles établies en matière de la SST de droit civil en matière de responsabilité (EC, 2018). En conséquence, les lois doivent être révisées pour intégrer une technologie d'intelligence artificielle avancée sur le lieu de

travail afin d'identifier les risques croissants et de contrôler les risques pour la SST (Moore, 2019; Badri et al., 2018).

Un examen approfondi de la sécurité et de la santé doit être envisagé par les professionnels de la SST, les chercheurs, les employeurs et les travailleurs avant de placer des applications basées sur l'intelligence artificielle sur le lieu de travail (Howard, 2019).

c) Robotique collaborative (Cobotique)

Avant la quatrième révolution industrielle, les robots fonctionnaient dans des espaces confinés et selon des mouvements planifiés avec précision. De nos jours, les cobots sont beaucoup plus flexibles et indépendants pour pouvoir interagir étroitement avec les travailleurs et faire les tâches. Les robots sont capables d'effectuer des tâches physiques répétitives sans fatigue, et de soulever des objets lourds qui ne sont pas transportables d'une façon sécuritaire par les travailleurs (Neumann et al., 2021; Knudsen et Kaivo-oja, 2020). Cependant, la complexité et le dynamisme de l'environnement de travail réduisent leur fiabilité (Badri et al., 2018). Le contrôle des cobots dans un système automatisé dépend de plus en plus de la fiabilité des dispositifs de sécurité (Brocal et al., 2019).

Les cobots sont conçus en considérant la sécurité humaine. Ainsi, dans leur conception, les arêtes pointues et les moteurs exposés ont été évités. Les cobots ont également des dispositifs de surveillance de vitesse très sensibles pour s'assurer qu'ils se déplacent à une vitesse sécuritaire dans les zones partagées avec des humains et pour s'arrêter si un travailleur dépasse la distance sécuritaire avec le cobot. (Naylor, 2019).

Selon (Cui et al., 2014), la plupart des accidents ne surviennent pas pendant les opérations normales, mais lors de la maintenance, de l'inspection, des tests, des réglages, etc. Les incidents liés à la présence des robots dans le milieu de travail peuvent être divisés en 4 catégories (Cui et al., 2014) :

- Accidents causés par une performance inappropriée et à des mouvements inattendus des composants ou des périphériques du bras du robot durant le fonctionnement ou la maintenance (IRSST, 2017);

- Accidents causés par la libération de pièces et divers types de pannes mécaniques;
- Autres événements connexes tels que les sources d'énergie pneumatiques ou hydrauliques ou électriques (décharge électrique, surpression hydraulique, etc.) ou des sources environnementales (interférences électromagnétiques ou radiofréquence) ou une installation et une conception incorrectes de l'équipement, etc.

La robotique collaborative présente un risque de troubles musculosquelettiques (TMS). Bien que le robot soit conçu pour réduire le risque de TMS en déchargeant le travailleur des tâches répétitives, il est important de noter que le fonctionnement collaboratif du robot peut encore engendrer des TMS à long terme (IRSST, 2017).

Les cobots aident les travailleurs à accroître leur sécurité et leur productivité, mais ont un effet négatif sur la santé mentale des travailleurs. En effet, beaucoup de travailleurs pensent que les cobots vont les remplacer (Haight, 2020; Rampersad, 2020). L'interaction homme-robot peut être considérée également comme une source de danger impactant la santé mentale des travailleurs (Neumann et al., 2021; Adem et al., 2020; Nekhoda et Kuklina, 2020; Brocal et al., 2019; Badri et al., 2018).

Pour que les robots puissent suivre les comportements appropriés, lors de l'interaction physique avec les humains, les mouvements du robot et les facteurs liés à la sécurité doivent être bien pris en charge (Beetz et al. 2015). Les concepteurs doivent s'assurer que leurs exigences de conception sont cohérentes avec les capacités sensorielles, cognitives et motrices des humains. Les systèmes doivent être conçus en tenant compte des contraintes humaines pour réduire à la source les conséquences négatives pour les travailleurs (Neumann et al., 2021; Haight, 2020).

Étant donné que le RSST aborde l'accès aux zones dangereuses d'une machine en fonctionnement, mais non pas le partage de l'espace de travail avec des machines, il

semble important d'anticiper les risques associés aux robots collaboratifs utilisés afin de prévenir les problèmes de SST (IRSST, 2017).

Badri et al. (2018) ont constaté qu'il y a un manque de normes appropriées pour les robots collaboratifs.

d) Simulation

De nombreux fabricants utilisent aujourd'hui des simulateurs pour évaluer pleinement l'impact des scénarios d'amélioration des processus et des nouvelles configurations de système dans un environnement sécuritaire. En apportant des changements et des modifications au processus de production simulé et la prévision des étapes de la production, il est possible d'éviter de perdre de l'argent, du temps, de minimiser les risques de production et le stress liés au travail. En simulant plusieurs scénarios de production, on assure des processus ergonomiques sécuritaires et pratiques (Badri et al., 2018).

En principe, avant de mettre en œuvre des scénarios susceptibles de présenter des dangers pour les machines et les travailleurs, la probabilité et la gravité de ces dangers peuvent être estimées par simulation et ainsi, évitées (Hu et al., 2021).

Selon Badri et al. (2018), le recours excessif aux informations et aux modèles de simulation, ainsi que l'obtention de résultats biaisés peuvent entraîner des problèmes de SST. En outre, le manque de normes appropriées dans ce domaine afin qu'un meilleur suivi soit fait peut indirectement causer des problèmes de SST.

e) Internet des Objets, Internet des Services et Systèmes cyberphysiques

Dans l'Industrie 4.0, l'automatisation avancée transforme l'environnement de travail en un environnement plus ergonomique, en créant des lieux de travail sans stress et plus conviviaux pour les employés (Brocal et al., 2019). Les TIC sans fil (comme les capteurs, les réseaux de communication, les systèmes d'alerte, les dispositifs de détection de mouvement, etc.) sont capables de détecter les dangers avant qu'ils ne se produisent et

sont donc d'une grande importance pour améliorer la sécurité au travail (Gisbert et al., 2014). Des systèmes d'exploitation technologiques capables de surveiller les performances de tous les réseaux et de relier les capteurs aux centres de contrôle à distances sont de plus en plus utilisés. Ces systèmes d'exploitation réduisent les risques professionnels en facilitant l'intégration des programmes de surveillance (Badri et al., 2018).

L'utilisation de l'IoT et des capteurs dans les ÉPI (comme les capteurs de température, de gaz, de mouvement, etc.) permet de mettre en œuvre automatiquement la gestion de la sécurité. Les capteurs utilisés dans les technologies portables avertissent, lorsque les travailleurs sont exposés aux produits chimiques ou ils se comportent anormalement et dangereux (Liu et al., 2020b). Le système portable intelligent est basé sur une technologie d'information multisources qui envoie des signaux vitaux pour analyser les risques de sécurité afin de soutenir les opérations (Bavaresco et al., 2021). Les autres applications de l'IoT servent à identifier la fin de vie des ÉPI utilisés par les travailleurs et à les avertir pour activer à temps les systèmes de protection (Podgórski et al., 2017).

En affectant directement les travailleurs, Les CPS créent un nouveau type d'interaction entre les mondes numériques et physiques, les humains et les machines. En conséquence, les nouvelles conceptions de l'Industrie 4.0 devraient mettre l'accent sur les capacités physiques, sensorielles et cognitives humaines (Kadir et al., 2019).

Les dispositifs utilisés dans les CPS recueillent une grande quantité d'informations détaillées en temps réel tels que l'exposition à des produits chimiques toxiques, à des radiations lumineuses et à des températures élevées ou basses. Ils surveillent également la santé des travailleurs en mesurant des paramètres physiologiques tels que la fréquence cardiaque, la température corporelle, le niveau de respiration, etc. Ils peuvent deviner l'état mental du travailleur grâce aux données IoT dans un souci de prévention (Bavaresco et al., 2021; PEROSH, 2012).

Le but des cybermenaces et des attaques contre le CPS est d'endommager ou de désactiver les fonctionnalités du système. Il existe différents types de cybermenaces qui peuvent

causer des dommages à l'ordinateur hôte ou une défaillance de l'équipement (Elhabashy et al., 2019). Par conséquent, l'identification et le contrôle des vulnérabilités des CPS sont essentiels pour de bonnes performances dans un environnement de production cyberphysique (Sturm et al., 2017).

Les systèmes IoT risquent d'être piratés en raison de l'existence de systèmes et de capteurs cyberphysiques qui génèrent beaucoup de données. Par conséquent, la présence d'un système unique de gestion de la sécurité se fait sentir. Pour le traitement de données volumineuses dans l'Industrie 4.0, des architectures sécurisées sont nécessaires pour couvrir efficacement toutes les couches d'abstraction de systèmes hétérogènes et les limites des systèmes d'exploitation (Cioca et Ivascu, 2014). La fiabilité de l'infrastructure réseau IoT et les modèles de décision qui déterminent les performances du système sont essentiels. Les données et les infrastructures peu fiables et les décisions incorrectes peuvent avoir un impact grave et irréversible sur les travailleurs (Moore et al., 2020).

Les menaces de cybersécurité (les cyberattaques) évoluent très rapidement. Il est donc essentiel d'estimer les dommages directs et indirects des cyberattaques pour définir les priorités et ainsi réduire ces dommages. Les deux catégories les plus importants risques sont physiques et psychologiques (Agrafiotis et al., 2018). La divulgation et le piratage de l'information peuvent endommager ou détruire les biens physiques ou numériques, ou même entraîner des blessures physiques ou le décès des travailleurs (Corallo et al., 2020). Ils peuvent être à la source de plusieurs pathologies psychologiques comme le stress, l'épuisement professionnel, la dépression et les troubles anxieux (Agrafiotis et al., 2018).

Cependant, l'utilisation de tels dispositifs pour suivre le comportement, la productivité et la performance des travailleurs peut créer une atmosphère tendue sur le lieu de travail, une atteinte à la vie privée et menacer ainsi l'état psychologique (Neumann et al., 2021; Ben-Ner et Urtasun, 2013). Les menaces psychologiques sont désormais un problème majeur souvent ignoré (Adem et al., 2020).

L'absence de normes ou de mises à jour concernant les technologies de l'Industrie 4.0, y compris l'IoT, l'IoS et les CPS, peut avoir des conséquences majeures en termes de SST,

car les nouvelles technologies ne seront plus soumises aux normes applicables de la génération précédente (Badri et al., 2018).

f) Infonuagique (Cloud Computing)

La sécurité est un problème majeur lors de l'utilisation de l'infonuagique qui peut entraîner des problèmes personnels, éthiques et financiers (Agrafiotis et al., 2018; Jeyaraj et Subramanian, 2018). Plus qu'il y a de l'information et des données dans les nuages, plus le problème de perte de données est grand. L'externalisation des données met en péril la sécurité, l'intégrité et l'accès protégé (Ben Arfa Rabai et al., 2013).

Les menaces intentionnelles dans les nuages incluent l'accès non autorisé aux informations, l'interception, la falsification, les attaques de pirates informatiques, etc. (Ben Arfa Rabai et al., 2013). Les menaces accidentelles comprennent les erreurs des utilisateurs, la négligence, la curiosité, etc. Ces risques peuvent être réduits en utilisant simultanément des protocoles de cryptage et des codes de correction d'erreur (Jeyaraj et Subramanian, 2018). Une autre solution consiste à utiliser un système de contrôle et de protection des informations basé sur le concept actif (Tchernykh et al., 2019).

L'utilisation des services infonuagique dépend de la taille de l'entreprise. Les services infonuagiques sont attractifs pour les PME, car ils leur permettent d'éviter d'investir dans l'infrastructure informatique (Assante et al., 2016). En revanche, les grandes entreprises disposent de plus de ressources financières et physiques pour maintenir leur infrastructure interne, ce qui leur permet de mieux contrôler la sécurité et la confidentialité des données et le maintien de la performance des processus d'affaires (Mu-Hsing Kuo, 2011). Les grandes entreprises, quant à elles, bénéficient d'une gestion des risques plus avancée et d'équipes informatiques spécialisées dans les risques liés à l'infonuagique (Brender et Markov, 2013). À l'aide de logiciels basés dans l'infonuagique, les entreprises pourront combiner toutes les technologies de sécurité en une seule plateforme et bénéficier d'une évaluation et d'une gestion professionnelles des risques (Cioca et Ivascu, 2014).

g) Réalité augmentée (RA)

Avec l'aide de la RA, les dispositifs de contrôle utilisés permettent la collecte de données en temps réel sur le lieu de travail (Naylor, 2019). La RA identifie les scénarios de dangers sur la base d'algorithmes, effectue l'évaluation des risques en temps réel en se basant sur les données historiques et alerte les travailleurs dans le cas de rapprochement des zones dangereuses connues avec des lunettes spéciales utilisées dans les chaînes de montage (Ninness, 2018). Pendant les opérations de maintenance, l'écran du casque équipé de RA est en mesure de fournir les instructions nécessaires pour améliorer la précision lors de la maintenance et réduire les erreurs évitables. Les casques intelligents sont donc capables de réduire les risques de SST (Naylor, 2019). Aussi, la RA améliore les ÉPI et leur permet de collecter des informations environnementales en temps réel (Liu et al., 2020b).

RA est applicable pour aider à réduire le stress des travailleurs et également pour améliorer l'ergonomie cognitive des travailleurs en collectant des informations du monde réel et en supprimant les informations inutiles (Kadir et al., 2019). La réalité augmentée permet une formation adéquate à la sécurité opérationnelle précisément sur l'identification des dangers et les mesures d'urgence (Bavaresco et al., 2021 ; Kim et al., 2019).

L'utilisation de lunettes stéréoscopiques pour observer la réalité augmentée peut limiter la production de mouvements cinétiques et causer des étourdissements et des nausées (Li et al., 2018). Dans ce cas, la performance de la personne face à des équipements à haut risque peut être réduite. Les utilisateurs de la réalité augmentée peuvent avoir des perceptions différentes de l'objet, du processus ou du système visualisé en raison de différents facteurs personnels et culturels (Fox et al., 2020). En l'absence de précision et de simplification des informations virtuelles lors de la conception, ces problèmes peuvent entraîner des lésions professionnelles (Li et al., 2018).

À l'instar des appareils IoT, les appareils de RA sont vulnérables aux cyberattaques. Le maintien de la confidentialité, de l'intégrité et de la disponibilité des données est une préoccupation majeure pour la sécurité et la confidentialité des données (Gupta, 2017). Les types de cybermenaces, telles que la fraude et la manipulation des données, peuvent

fournir à l'utilisateur des informations inexacts même si la source est réelle (Dissanayake, 2018; Gupta, 2017). Les cyberattaques ciblées peuvent manipuler et déformer les résultats (Dissanayake, 2018).

Les normes existantes n'ont pas été élaborées pour les nouvelles technologies. Par conséquent, ils ne tiennent pas compte des risques causés par des technologies de pointe. L'application d'anciennes normes ou de normes pas adaptées peut entraîner des problèmes de SST, si les risques existants ne sont pas prévus (Badri et al., 2018).

h) Jumeaux numériques

Dans l'interaction traditionnelle homme-robot, toute modification de l'environnement d'assemblage ou de production nécessite une reprogrammation de ces interactions. Avec l'utilisation de jumeaux numériques, les mouvements des humains et des robots sont mis à jour simultanément pour éviter les erreurs (Liu et al., 2020a). Le jumeau numérique est capable d'analyser l'ergonomie des travailleurs, d'attribuer des tâches, de localiser et de tester la planification des robots (Linli et al., 2019). Dans les situations où les opérations physiques peuvent causer des dommages aux personnes et aux machines, les jumeaux numériques peuvent exécuter ce processus de manière plus sécuritaire dans un environnement simulé sans effets indésirables et sans risques (Liu et al., 2020a). Avec l'aide de jumeaux numériques, les opérateurs peuvent être formés sur une machine virtuelle sans travailler sur une vraie machine sans risques pour eux-mêmes et pour la machine (Rodic, 2017).

Parce que le jumeau numérique fonctionne en parallèle avec la machine réelle, il est capable de détecter instantanément l'écart fonctionnel du modèle existant avec le système physique réel (Liu et al., 2020a; Goossens, 2017). D'un autre côté, un jumeau numérique est capable de prendre conscience de lui-même, d'optimiser ses performances et de détecter rapidement les dangers lorsqu'il interagit avec d'autres opérateurs et machines (Goossens, 2017). Les jumeaux numériques doivent représenter avec précision le système physique. S'il existe un écart entre le jumeau numérique et le système réel, une mauvaise représentation du système physique peut entraîner des comportements incontrôlables et

des problèmes de sécurité. D'ailleurs, la vulnérabilité des jumeaux numériques ainsi que l'accès des pirates informatiques aux informations du système réel peuvent entraîner des problèmes sérieux en cybersécurité (Hearn et Rix, 2019).

i) Fabrication additive

Les processus soumis à la FA peuvent réduire les risques de nombreux processus courants de fabrication. En principe, ils peuvent être autonomes, utiliser moins de matériaux et produire moins de déchets. La FA simplifie le processus de production en augmentant le degré d'automatisation et peut réduire la charge physique et améliorer la sécurité sur le lieu de travail. La mise en œuvre de la production additive modifie également l'environnement de travail et réduit le taux d'accidents et de risques pour la sécurité dus à l'automatisation des processus (Paolini et al., 2019). En analysant les effets de la FA sur le cycle de vie du produit, on peut conclure que les étapes de fabrication et de conception, ainsi que l'intégration de la géométrie et des performances, sont associées au plus grand potentiel de risque (Zimmermann et al., 2019). La connaissance des risques et des avantages potentiels de la FA est essentielle pour que les utilisateurs comprennent pleinement les potentiels des technologies de FA. L'utilisation de matériaux non conventionnels pendant la FA peut soulever diverses préoccupations en matière de santé au travail :

- La toxicité et la nature dangereuse des matières premières, en particulier lorsque des poudres fines telles que des poudres métalliques et les résines et polymères sont utilisées (Nagarajan et al., 2020; Buranska et Buransky, 2019; Zhang et al., 2018);
- Les risques d'émissions de gaz et de particules, en particulier lorsque ceux-ci peuvent prendre la forme de nanoparticules (Rejeski et al., 2018). Certains procédés de production de FA utilisent des gaz capables de déplacer l'air ambiant dans un espace de travail local comme l'argon et l'azote qui diminuent le taux d'oxygène (Bates et Robertson, 2020).

L'émission de particules en suspension est étroitement liée au mouvement de la tête d'impression (Simon et al., 2017). Certains des équipements utilisés en FA contiennent des sources d'énergie potentiellement dangereuses telles que des buses chauffées, des lasers et des faisceaux d'électrons qui présentent des risques sérieux de brûlure (Bates et Robertson, 2020 ; Buranska et Buransky, 2019). Une conception défectueuse du produit final ainsi que des défauts du produit dus à un processus de production inapproprié et à un matériau initial de qualité médiocre peuvent causer des blessures physiques à l'utilisateur final et entraîner une plainte contre le fabricant (Moreno-Cabezali et Fernandez-Crehuet, 2020).

À l'ère de l'Industrie 4.0, l'utilisation d'Internet pour collecter, traiter et partager les données posera des problèmes de sécurité. Dans le cas de la FA, les risques de cybersécurité identifiés sont présents dans chacune des étapes du processus de FA, qui comprend le modèle CAD (Computer-aided design), le fichier STereoLithography (STL), le fichier parcours d'outil et la machine physique. Les attaques éventuelles à chaque étape sont décrites ci-dessous (Moreno-Cabezali et Fernandez-Crehuet, 2020) :

- Les attaques au stade du modèle CAD sont de type vol ou déchiffrement de fichiers;
- Les attaques au stade du fichier STL sont du type piratage du profil d'objet physique et sa modification (Belikovetsky et al., 2017);
- Au stade du fichier parcours d'outil, les attaques peuvent inclure le placement ou le retrait du matériau de son emplacement correct ou l'endommagement de la pièce pendant que la machine travaille (Sturm et al., 2017);
- Dans la phase de la machine physique, lorsqu'un objet est imprimé, les attaques peuvent impliquer la modification des paramètres et des informations de processus clés telles que la vitesse, l'intensité du laser et la température de la buse (Sturm et al., 2014). Cela peut endommager l'équipement de production ou réduire la qualité du produit et, dans les pires conditions,

entraîner des dommages ou le décès de l'opérateur (Moreno-Cabezali et Fernandez-Crehuet, 2020).

1.3.4 Portrait initial des opportunités et menaces potentielles des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST

Puisque la quatrième révolution industrielle (Industrie 4.0) se concrétise de plus en plus, il semble évident qu'elle conduira à un changement de paradigmes industriels qui influencera la prise en compte de la santé et la SST.

Afin de mieux comprendre les opportunités et les menaces de SST auxquelles les entreprises manufacturières font face en contexte de la transformation vers l'Industrie 4.0, un portrait initial des opportunités et menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST a été développé sur la base de revue de la littérature. Le portrait est synthétisé dans le Tableau 1.4 suivant.

Tableau 1.4 Portrait initial des opportunités et menaces potentielles des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST en contexte d'une transformation numérique des PME manufacturières

Groupe technologique de l'Industrie 4.0	Opportunité potentielle en SST	Références	Menaces potentielles en SST	Références
Mégadonnées	<ul style="list-style-type: none"> - Décision en temps réel - Amélioration de la sécurité et de la stabilité du système - Capacité à suivre et analyser le comportement des travailleurs - Prévission des erreurs du système - Performance améliorée 	Badri et al. (2018), Vogl et al. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> - Accidents de travail (Blessures dues à des erreurs de données ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique) - Maladies professionnelles (Problèmes psychologiques : stress, surcharge mentale, épuisement professionnel, anxiété, etc.) - Absence de normes ou de règlements adaptés en SST 	Turk et al. (2021); Agrafiotis et al., (2018), Badri et al. (2018); Cole et al. (2015)
Intelligence artificielle	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de l'efficacité des programmes de formation - Décision en temps réel - Reconnaissance rapide des dangers - Évaluation avancée des risques - Identification des risques psychosociaux en temps réel - Détection d'anomalies du réseau afin de réduire l'impact des cyberattaques 	Alhayani et al. (2021); EU-OSHA, (2021); Abioye et al., (2021); Ribeiro et al., (2021); Howard, (2019); Badri et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> - Maladies professionnelles (Problèmes psychologiques : stress, surcharge mentale, épuisement professionnel, anxiété, etc.) - Accidents de travail (Blessures dues à des données ou des modèles non fiables ou à la sécurité informatique) - Absence de normes ou de règlements adaptés en SST 	Vaio et al. (2021); EU-OSHA. (2021) Galaz et al. (2021); Sunarti et al. (2021); Bousdekis et al.(2020); Moore (2019); Badri et al. (2018); Lee et al. (2018)

Tableau 1.4 Portrait initial des opportunités et menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST en contexte d'une transformation numérique des PME manufacturières (suite)

Groupe technologique de l'Industrie 4.0	Opportunité potentielle en SST	Références	Menaces potentielles en SST	Références
Robotique collaborative	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des tâches répétitives, ardues et dangereuses - Interaction de manière plus flexible et indépendante avec les travailleurs - Capacité d'interpréter les émotions humaines et de collaborer plus étroitement - Précision accrue dans les tâches assez complexes - Réduction des troubles musculosquelettiques (TMS) 	Neumann et al., (2021); Knudsen et Kaivo-oja, 2020; Badri et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> - Accidents de travail (Blessures dues à des erreurs de données ou des écarts d'intégration ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique, écrasement, pression, chocs, etc.) - Maladies professionnelles (Problèmes psychologiques : stress, surcharge mentale, épuisement professionnel, anxiété, etc.) - Absence de normes ou de règlements adaptés en SST 	Neumann et al. (2021); Adem et al. (2020); Haight (2020); Nekhoda et Kuklina (2020); Rampersad (2020); Brocal et al. (2019); Badri et al. (2018); IRSST (2017); Cui et al. (2014)
Simulation	<ul style="list-style-type: none"> - Capacité à analyser des situations de travail afin de mettre en place des processus plus ergonomiques, sécuritaires et pratiques - Aide à prévention des risques par l'estimation la probabilité et la gravité des dangers liés aux machines et aux travailleurs dans différents contextes de travail 	Hu et al., (2021); Badri et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> - Accidents de travail (Blessures dues à des erreurs de données ou des écarts d'intégration ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique) - Absence de normes ou de règlements adaptés en SST 	Badri et al. (2018)

Tableau 1.4 Portrait initial des opportunités et menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST en contexte d'une transformation numérique des PME manufacturières (suite)

Groupe technologique de l'Industrie 4.0	Opportunité potentielle en SST	Références	Menaces potentielles en SST	Références
Internet des objets ou des services et Systèmes cyberphysiques	<ul style="list-style-type: none"> - Diagnostic des erreurs avant arrêts - Collecte en temps réel des données critiques concernant les travailleurs, les agresseurs, l'environnement physique, etc. - Aide à contrôler et à améliorer la performance des équipements de protection collective et individuelle - Amélioration de l'ergonomie du travail - Aide à détecter les erreurs grâce à la communication en temps réel entre les machines 	<p>Bavaresco et al. (2021) ; Liu et al. (2020b) ; Badri et al. (2018) ; Podgórski et al. (2017) ; Gisbert et al. (2014) ; PEROSH (2012)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Accidents de travail (Blessures dues à des erreurs de données ou des écarts d'intégration ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique) - Maladies professionnelles (Problèmes psychologiques : stress, surcharge mentale, épuisement professionnel, anxiété, etc.) - Absence de normes ou de règlements adaptés en SST 	<p>Neumann et al. (2021); Corallo et al. (2020); Adem et al. (2020); Moore et al. (2020); Agrafiotis et al. (2018); Badri et al. (2018) Elhabashy et al. (2019); Ben-Ner et Urtasun. (2013);</p>
Infonuagique	<ul style="list-style-type: none"> - Capacité de stockage de données de grands volumes pour l'exploiter en gestion des risques 	<p>Cioca et Ivascu (2014)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Accidents de travail (blessures dues aux problèmes d'accès à des données cruciales ou à la sécurité informatique) - Absence de normes ou de règlements adaptés en SST 	<p>Fox et al. (2020); Agrafiotis et al. (2018); Badri et al. (2018); Ben Arfa Rabai et al. (2013)</p>

Tableau 1.4 Portrait initial des opportunités et menaces potentielles des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST en contexte d'une transformation numérique des PME manufacturières (suite)

Groupe technologique de l'Industrie 4.0	Opportunité potentielle en SST	Références	Menaces potentielles en SST	Références
Réalité augmentée	<ul style="list-style-type: none"> - Capacité à collecter les données en temps réel - Évaluation des risques et diagnostic des dangers en temps réel - Capacité de fournir des instructions pour améliorer la précision lors de la maintenance afin de réduire les erreurs évitables - Amélioration de la performance des ÉPI - Amélioration de l'efficacité des programmes de formation 	Bavaresco et al. (2021) ; Liu et al. (2020b); Kim et al. (2019); Naylor (2019); Ninness (2018)	<ul style="list-style-type: none"> - Accidents de travail (Blessures dues à des erreurs de données ou des écarts d'intégration ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique, limitations visuelles et de perception, étourdissement, fatigue, etc.) - Absence de normes ou de règlements adaptés en SST 	Dissanayake (2018) ; Li et al. (2018); Gupta (2017)
Jumeaux numériques	<ul style="list-style-type: none"> - Optimisation des tâches et des interactions partagées entre les travailleurs et robots - Capacité d'une analyse approfondie de l'ergonomie du travail - Simulation de l'environnement de travail avant implantation ou modification - Capacité de formation des travailleurs sur les machines sans risques - Identification instantanée des écarts de performances afin d'éviter les erreurs 	Liu et al. (2020a) ; Linli et al. (2019) ; Rodic (2017) ; Goossens (2017)	<ul style="list-style-type: none"> - Accidents de travail (Blessures dues à des erreurs de données ou des écarts d'intégration ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique) - Absence de normes ou de règlements adaptés en SST 	Hearn et Rix (2019); Badri et al. (2018)

Tableau 1.4 Portrait initial des opportunités et menaces potentielles des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST en contexte d'une transformation numérique des PME manufacturières (suite)

Groupe technologique de l'Industrie 4.0	Opportunité potentielle en SST	Références	Menaces potentielles en SST	Références
Fabrication additive	<ul style="list-style-type: none"> - Élimination des dangers de blessures fréquents causés par des machines conventionnelles (écrasement, cisaillement, coupure, etc.) - Réduction des TMS 	Paolini et al. (2019)	<ul style="list-style-type: none"> - Accidents de travail (Blessures dues à des erreurs de données ou des écarts d'intégration ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique, incendies, brûlures, etc.) - Maladies professionnelles (Problèmes respiratoires ou cutanés) - Absence de normes ou de règlements adaptés en SST 	Bates et Robertson (2020) ; Moreno-Cabezali et Fernandez-Crehuet (2020); Nagarajan et al. (2020) ; Buranska et Buransky (2019); Badri et al. (2018); Rejeski et al. (2018) Zhang et al. (2018); Belikovetsky et al. (2017); Graffet et al. (2017); Sturm et al. (2014)

1.3.5 Gestion des risques et évaluation de la performance en SST

Lors de l'évaluation des performances en matière de SST, il convient de tenir compte de la taille de l'entreprise, de sa performance en SST et du secteur d'activité (MacEachen et al., 2010). Les PME ont moins de capacité à évaluer et à contrôler les risques que les grandes entreprises (Masi et Cagno, 2015; Hasle et Limburg, 2006). La taille d'une entreprise peut affecter directement la fréquence et la gravité des accidents. À mesure que la taille de l'entreprise augmente, la complexité organisationnelle augmente et plus l'entreprise est complexe, plus les obstacles à la SST sont importants (Masi et Cagno, 2015).

La principale raison des interventions de SST dans l'industrie est d'empêcher les blessures chez les travailleurs et les pertes économiques (Hämäläinen et al., 2009). Ces pertes comprennent l'indemnisation et l'assurance, le remplacement de la main-d'œuvre qualifiée et la récupération de la position de l'entreprise sur le marché. Pour bien identifier les risques professionnels, il faut faire la distinction entre danger et risque (Fernández et Pérez, 2015). Selon la définition de CCOHS (2020), un danger est toute source de dommages potentiels ou d'effets néfastes sur la santé de quelqu'un. Le danger est une caractéristique intrinsèque ou intégrée. Le risque est la chance ou la probabilité qu'une personne subisse un préjudice ou un effet néfaste sur sa santé si elle est exposée à un danger. Elle peut également s'appliquer aux situations de perte de biens ou d'équipements ou d'effets nocifs sur l'environnement.

L'évaluation des risques peut être divisée en trois processus généraux : l'identification des risques (par l'identification des dangers et leurs conséquences), l'analyse des risques et l'évaluation des risques (HSE, 2008). Le processus d'identification des risques comprend l'identification des causes et de la source des risques, c'est-à-dire le danger dans le contexte des dommages physiques (BSI, 2010). Un principe fondamental de la gestion est la mesure de la performance qui devrait être proportionnelle à la taille de l'entreprise (Liu et al., 2020b). Ceci est très important, car la mesure de la performance détermine l'écart

entre la performance actuelle et la performance souhaitée et montre les signes de progrès ou le contraire. Selon le Gouvernement de l'Alberta (2020), les principaux éléments d'un système de gestion de la SST comprennent la politique, l'organisation, la planification et la mise en œuvre, la mesure de la performance, ainsi que le contrôle et la surveillance.

Les approches de gestion de la SST peuvent être classées en deux grandes catégories : 1) une approche orientée vers la personne qui se concentre sur les éléments de sécurité des individus, tels que la formation en matière de sécurité, les programmes d'assurance de la santé au travail, etc. 2) une approche orientée vers les lieux qui se concentre sur le contrôle et l'élimination des dangers sur le lieu de travail, comme le programme d'inspection et d'analyse des dangers (Bélanger et Brouillard, 2017). L'évaluation des performances peut être définie comme le processus de mesure de l'efficacité des actions (Neely et al., 1995).

Évaluation de la performance en SST est complexe et elle devrait être conduite de manière continue et périodique pour pouvoir vérifier l'impact des mesures mises en place et des outils utilisés (MacEachen et al., 2010). C'est possible d'évaluer la performance d'une entreprise en matière de SST en fonction des primes versées par année. Au Québec, ce montant est comptabilisé comme un coût direct (Roy et al., 2004). Les variations de ce taux indiquaient des fluctuations de la performance de l'entreprise du point de vue de la CNESST (Roy et al., 2004).

Pour que la gestion de la SST soit efficace dans les PME, l'approche doit être simple, peu coûteuse et adaptée aux besoins des travailleurs et des gestionnaires (Sinclair et al., 2013; Hasle et Limburg, 2006). Pour améliorer la SST, plusieurs éléments doivent être ciblés. La faiblesse ou l'absence de l'un de ces éléments aura un effet négatif sur la SST (Tremblay et Badri, 2018) :

- L'engagement de la haute direction (BSI, 2007) : il se manifeste principalement à travers l'exemplarité comportementale, qui fait référence à la façon dont les dirigeants valorisent, réfléchissent et agissent en accord avec les objectifs de SST. Cela signifie qu'ils doivent démontrer un engagement émotionnel envers la sécurité, une réflexion cognitive sur les risques et les

meilleures pratiques, ainsi que des comportements spécifiques respectant les normes de SST. Le comportement exemplaire de la haute direction joue un rôle essentiel dans la création d'une culture axée sur la SST, tout en favorisant la participation et l'engagement de tous les acteurs de l'organisation (Blanc et al., 2018);

- Le Leadership par la haute direction : les deux aspects les plus importants du leadership sont : 1) le soutien de la participation des travailleurs et 2) la communication efficace avec les travailleurs et la prise en charge de leurs préoccupations (Simard et Marsand, 1997);
- La sensibilisation du gestionnaire sur la nécessité de mettre en œuvre un système de gestion de la SST;
- La mise en place dans un système de gestion des risques. L'amélioration des performances SST dans les PME n'est pas possible sans une maîtrise des risques professionnels (BSI, 2007);
- La formation du personnel aux bonnes pratiques de travail;
- Le comportement sécuritaire, notamment le respect des règles de sécurité et la participation à l'identification et à l'élimination des dangers;
- La mise en place de la prévention comme une initiative d'amélioration;
- Le développement d'une culture de sécurité (O'Toole, 2002) : La culture de sécurité est un facteur efficace dans l'évaluation des risques, et le système de gestion de la SST affecte la culture de la sécurité. En conséquence, de nombreuses activités qui soutiennent le développement d'une culture de la sécurité positive doivent être mesurées (Gouvernement de l'Alberta, 2020).

L'engagement de la haute direction et la gestion des risques sont tous les deux indispensables pour évaluer les PME. Afin d'améliorer la performance de l'entreprise, l'employeur doit utiliser ces éléments et vérifier leur efficacité et prévoir également la

possibilité d'une maîtrise correcte des risques (MacEachen et al., 2010). Ils existent quelques normes pour évaluer la performance d'un système de gestion de la SST, parmi lesquelles, la norme de l'Organisation internationale de Normalisation (ISO) 45001 est la plus reconnue (BSI, 2007). Elle a remplacé OHSAS 18001. La norme ISO 31000 fournit des directives génériques pour la gestion des risques dans toutes les entreprises indépendamment de leurs tailles (Gisbert et al., 2014). La norme est compatible avec ISO 9001 et ISO 14001 et elles sont également complémentaires (Gegic, 2008).

Les raisons principales de ne pas appliquer ces normes dans les PME sont, entre autres, les coûts de certification, les problèmes de motivation du personnel, les problèmes de changement de culture de l'entreprise et l'augmentation de la bureaucratie (Santos et al. 2013).

Selon Granerud et Rocha (2011), la certification SST est une sorte de réglementation qui oblige l'entreprise à remplir certaines obligations légales et augmente également la participation aux processus organisationnels pour améliorer continuellement les conditions de SST. Le fait d'avoir un certificat OHSAS 18001 ne peut garantir une bonne performance dans la gestion de la SST. La certification représente un facteur déterminant pour l'amélioration de la performance en SST des entreprises (Ghahramani et Salminenb, 2019).

L'évaluation de la performance se fait essentiellement à l'aide des indicateurs de performance. Les indicateurs clés de performance sont utilisés pour mesurer la performance opérationnelle en SST et ils doivent être cohérents avec la taille de l'entreprise, le secteur d'activité, la nature des risques et la maturité organisationnelle de l'entreprise. Certains de ces indicateurs peuvent être liés en des relations causales (Rodriguez et al., 2009). Pour réduire le temps et la complexité de l'analyse de la performance, les indicateurs interdépendants doivent être éliminés autant que possible. En conséquence, il faut implanter des systèmes de mesure de la performance adaptés à l'entreprise avec un nombre optimal d'indicateurs clés (Podgórski, 2015). Les indicateurs

doivent également être spécifiques, mesurables, atteignables, réalistes et temporellement définis (ASSTSAS, 2018).

Le choix des indicateurs est une décision mutuelle qui est prise sur la base d'un consensus entre les spécialistes de la prévention, les gestionnaires et les travailleurs. Les indicateurs de SST doivent être uniformes dans le temps et cohérents avec les autres indicateurs afin de ne pas dévier de l'objectif (Bruneau, 2018). Pour développer un ensemble d'indicateurs de performance, il faut utiliser une approche globale tenant compte des divers facteurs associés à un système de gestion de la SST. Ces facteurs sont divisés en trois catégories (Sgourou et al., 2010) :

- Les facteurs techniques tels que le type et la disposition des équipements de travail, le degré d'automatisation, la conception de l'environnement de travail, la maintenance et les facteurs de sécurité connexes tels que les systèmes de contrôle des déviations, les ÉPI, les systèmes d'urgence;
- Les facteurs organisationnels, tels que la structure organisationnelle, les responsabilités, les canaux et le type de communication, l'adaptation au changement et le système de gestion de la SST (politique, engagement de la direction, responsabilités, ressources, etc.);
- Les facteurs humains tels que les facteurs environnementaux, organisationnels et professionnels et les caractéristiques humaines et personnelles qui affectent le comportement d'une personne au travail, sa santé et sa sécurité.

Les indicateurs peuvent généralement être divisés en différents types, par exemple (Salguero-Caparrós et al., 2020) :

- Indicateurs de processus, tels que l'évaluation des systèmes de gestion;
- Indicateurs de performance (ou résultats), tels que le taux de blessures;
- Indicateurs financiers, tels que le coût des réclamations.

Il existe deux types d'indicateurs de performance, réactifs et proactifs, et l'évaluation de la performance en SST est réalisée surtout à l'aide d'indicateurs réactifs (Tremblay et Badri, 2018; Roy et al., 2008). Les indicateurs réactifs les plus courants sont la fréquence des accidents et l'indice de gravité (Tremblay et Badri, 2018). Parmi les indicateurs réactifs de résultats, on peut mentionner les exemples suivants : Taux de fréquence (TF), Taux de gravité (TG), Indice de gravité (IG), Nombre de lésions indemnisées d'une durée de 181 jours et plus, Taux de cotisation d'un établissement versus le taux de l'unité de cotisation, Sommes imputées à la CNESST, Sommes d'assignation temporaire, etc. (ASSTSAS, 2018).

- L'utilisation d'indicateurs de performance réactifs est simple et peu coûteuse (Roy et al., 2008). Ils montrent une vue réelle de la performance et, d'autre part, en raison de leur format standard, ils peuvent être analysés et mis à l'échelle facilement, et en montrant le processus de suivi, ils peuvent montrer l'efficacité des mesures préventives (Tremblay et Badri, 2018). Ils permettent d'apprendre des erreurs du passé et d'établir un degré moyen de performance sur une période donnée (ASSTSAS, 2018). Au Québec, c'est d'ailleurs avec ce genre d'indicateurs que la CNESST calcule les cotisations.
- L'utilisation des indicateurs réactifs seuls n'est pas très fiable. Parce qu'ils ne montrent pas de changements à court terme. De plus, ils fournissent des informations sur la performance en SST avant la période de mesure. Ils ne fournissent pas une vue actuelle et le moyen d'anticiper les performances futures, et donc aucune base pour la mise en œuvre rapide des mesures correctives (Cadieux et al., 2006). Ces indicateurs ne précisent pas les opérations qui sont destinées à améliorer la performance, ce qui induit en erreur la gestion des risques, et les décisions basées sur ces indicateurs peuvent conduire à un cycle accidentel (Tremblay et Badri, 2018). Ils ne peuvent pas déceler les risques des maladies professionnelles qui prennent plusieurs années avant de se développer (ASSTSAS, 2018). En conclusion ces

indicateurs n'aident pas à prendre des décisions immédiates et de prédire les préformantes à long terme.

Les indicateurs de performance proactifs se concentrent sur les mesures préventives. Ils mesurent l'accomplissement des activités préventives dans l'entreprise en fonction de leurs priorités (Reiman et Pietikäinen, 2012). Ils permettent aux spécialistes de SST d'identifier les interventions à entreprendre en priorité (Roy et al., 2008). Ils fournissent des signaux d'alerte hâtifs sur les lacunes dans le système de gestion de SST et ils décrivent, aussi, ce que les gestionnaires doivent faire concrètement pour prévenir les lésions (ASSTSAS, 2018). Ils aident les travailleurs pour suivre les règles de sécurité et ils peuvent développer la culture de prévention. Ils sont flexibles et peuvent être modifiés (Gouvernement de l'Alberta, 2020). Quelques exemples d'indicateurs proactifs sont les mesures du climat de sécurité, la fréquence des inspections du lieu de travail et les niveaux d'exposition au bruit (Robson et al., 2017).

Les indicateurs proactifs présentent également des inconvénients. Tout d'abord, les informations qu'ils contiennent sont très spécifiques (Reiman et Pietikäinen, 2012). Ces indicateurs ne sont pas faciles à mesurer et sont sujets à des biais. Leur évaluation peut être longue et subjective (Reiman et Pietikäinen, 2012). La formation à leur utilisation est essentielle et les critères d'évaluation doivent être expliqués aux utilisateurs (Robson et al., 2012). La relation entre ce type d'indicateurs et le nombre des lésions professionnelles est encore inconnue (DelaTour et al., 2014). Par exemple, il n'a pas été déterminé à quelle fréquence les inspections devraient être effectuées pour atteindre un certain niveau de performance en SST. Ils peuvent surestimer les effets d'une mesure préventive si l'indicateur porte seulement sur la mise en place d'une activité et non sur ses résultats (ASSTSAS, 2018). Il y a différents types d'indicateurs proactifs en SST qui peuvent être classés en deux catégories :

- Indicateurs de prise en charge de la SST : ces indicateurs reflètent les critères sélectionnés de l'entreprise sur la base des normes et procédures qui y sont définies. Ils s'apparentent à des audits et doivent contrôler la conformité de

l'entreprise aux quatre principales étapes de l'amélioration continue du système de gestion de la prévention (planifier, faire, vérifier et agir);

- Indicateurs de moyens : ces indicateurs évaluent avec précision la mesure dans laquelle des données ont été prises pour atteindre l'objectif. Ils considèrent des actions effectuées comme des réalisations. Ces indicateurs représentent des mesures préventives qui ont été identifiées pour éliminer, réduire ou contrôler les risques antérieurs (ASSTSAS, 2018).

Ils existent trois approches principales pour mesurer les performances de SST (Cambon et al., 2005), soient : 1) l'approche basée sur les résultats, 2) l'approche basée sur l'adaptabilité et 3) l'approche basée sur les processus. Dans la première approche axée sur les résultats, des indicateurs réactifs sont utilisés pour mesurer la performance. Dans les deux autres approches, des indicateurs prédictifs sont utilisés. Les forces et les faiblesses de ces deux types d'indicateurs ne montrent qu'aucun de ces types à lui seul n'est capable de fournir une mesure précise et fiable de la performance en SST (Lingard et al., 2011). Pour obtenir une évaluation complète, les deux types doivent être utilisés simultanément, mais selon une approche globale (Tremblay et Badri, 2018). Les informations dévoilées par un type d'indicateurs peuvent confirmer ou bonifier les informations tirées par l'autre.

1.3.6 Exemples d'outils ou méthodes d'évaluation de la performance en SST

Il faut souligner qu'il existe plusieurs outils appartenant à des entreprises privées ou autres dédiés à l'évaluation de la performance en SST. Ici, on présente quelques-unes de ces outils.

- a) Outil d'autodiagnostic et un modèle de progression de la mesure en SST (Roy et al., 2008).

Il s'agit d'un questionnaire utilisé pour évaluer la gestion de la SST dans une entreprise. Il comprend une cinquantaine de questions selon 5 thèmes de base (engagement et soutien de la haute direction, participation des travailleurs, responsabilités en SST des

gestionnaires et des travailleurs, organisation de la prévention, évaluation de la performance en SST de l'établissement). Les participants doivent répondre aux questions sur une échelle de 10 points. Cet outil a été mis en œuvre dans trois entreprises canadiennes, mais les résultats ont montré que des modifications sont nécessaires pour atteindre le niveau de validation souhaité. Les outils d'autodiagnostic permettent aux entreprises d'utiliser des indicateurs prédictifs pour démontrer leurs performances de manière beaucoup plus précise et pertinente. Grâce à cet outil, on peut identifier les comportements, les procédures et les processus qui peuvent conduire à des accidents graves afin d'améliorer, à long terme, les conditions de SST.

b) La méthode des éléments de sécurité (MES) (Alteren, 1999)

La méthode MES est conçue pour évaluer et améliorer la performance en SST des entreprises minières. Les évaluations subjectives jouent un rôle prépondérant dans le MES, mais ces évaluations sont soutenues par un examen approfondi des données empiriques tel que les rapports d'accidents. MES est une méthode relativement simple, car l'hypothèse de l'évaluation est basée sur 6 éléments principaux (objectifs et ambitions, management, systèmes de rétroaction et d'apprentissage, culture de sécurité, documentation et indicateurs de résultats) et 12 sous-éléments de la SST. Les valeurs d'évaluation sont déterminées pour les éléments individuels sur une échelle de 5 niveaux. La méthode MES a été validée dans le cadre d'une expérience dans quatre mines norvégiennes. La méthode est pertinente dans les cas suivants :

- Identifier les faiblesses des systèmes et des pratiques de sécurité existants dans les entreprises;
- Se mettre d'accord sur la situation actuelle et sur les objectifs internes;
- Rendre plus visible l'effort de gestion de la sécurité afin d'obtenir un engagement interne, faciliter la communication interne et contribuer à une image positive de la sécurité.

c) Instrument d'évaluation universel (IEU) (Redinger and Levine, 1998)

L'outil d'évaluation globale (IEU) a été créé à l'Université du Michigan pour évaluer la performance de la gestion du système de santé aux États-Unis et dans d'autres pays. La version initiale de cet outil comprend 27 sections, 118 principes de gestion des systèmes de SST et 486 critères de mesure appartenant à 5 catégories : données SST, mise en œuvre et fonctionnement du processus SST, évaluation et rétroaction et amélioration. Treize modèles de système de gestion de la SST (SGSST) et de système de gestion environnementale (SGE) ont été examinés et quatre de ces modèles ont été sélectionnés comme modèles de base, à savoir : les programmes du *Voluntary Protection Programs*, la norme BS 8800 du British Standards Institute, la norme ISO 14001 l'Organisation internationale de Normalisation (ISO), etc. Cet outil a été mis en œuvre dans trois entreprises. En raison de la complexité de cet outil, il est plus dédié à des utilisateurs spécifiques éligibles. L'un de ses avantages est sa précision, couvrant un large domaine du SGSST.

d) Tripod Delta (Cambon et al., 2005)

Tripod Delta est issu d'un programme de recherche sur les moyens de prévention des erreurs humaines initié par le *Dutch Royal/Shell Group* en 1986. Il s'agit d'un outil complet basé sur un questionnaire proposé par une équipe d'experts français et néerlandais pour mesurer la performance du système de la gestion de SST. L'outil comprend environ 1 500 questions valides visant à identifier les zones de travail à risques. Dans la version expérimentale de l'outil, 230 indicateurs de performances structurelles et 90 indicateurs de performances opérationnelles ont été utilisés. Les indicateurs ont été attribués à 14 composantes du système de gestion de la SST.

Les facteurs de risques de base dans cette méthode sont les résultats de remue-ménages, des études des rapports d'audit et des analyses de scénarios d'accidents. Les études sur le terrain ont prouvé qu'il est valable pour toutes les applications industrielles.

e) Méthodes de contrôle qualité (Roy et al., 2004)

La gestion de la qualité étant indirectement liée à la gestion des risques, des démarches de contrôle de la qualité peuvent être mises en place dans l'entreprise pour améliorer les processus de santé et de sécurité. La norme ISO 45001 est compatible avec la norme de gestion de la qualité ISO 9001 (Vinodkumar et Bhasi, 2011). Les plus populaires des approches qualité sont le Kaizen, les Six-Sigma et le benchmarking. Par exemple, le benchmarking est un processus continu et régulier qui permet de documenter l'efficacité en termes de productivité, de qualité et de performance des aspects internes et externes (concurrents et industries directs et connexes)

f) Nouveau modèle d'évaluation des risques pour les PME (Law et al., 2006)

Le nouveau modèle de gestion des risques en contexte des PME intègre des modèles peu connus, comme le processus d'analyse hiérarchique (PAH). Cette technique est principalement utilisée dans le domaine de la gestion, notamment pour analyser différents scénarios. Dans quelques cas seulement, il a été utilisé pour analyser les risques pour la sécurité. Ce processus se divise en trois étapes. La première étape consiste à constituer une équipe et à catégoriser les risques majeurs. Ceci est réalisé en utilisant les techniques d'évaluation des risques basées sur des scénarios et PAH. La deuxième étape consiste à évaluer les risques avec le calcul de la sensibilité au risque en se basant sur la norme UNIE 7249 : 2007, qui présente des méthodes de calcul des indices de fréquence et de résultat, ainsi que l'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité, qui est utilisée pour évaluer les problèmes de sécurité. La troisième étape consiste à identifier et à classer les mesures préventives et de protection pour minimiser les risques. Ceci est réalisé en réutilisant certaines méthodes d'évaluation de la sécurité. La hiérarchisation des risques résultant du modèle d'évaluation des risques introduit a donné de meilleurs résultats en comparaison avec des méthodes traditionnelles (Fera et Macchiaroli, 2010).

g) Fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) model (Dagdeviren et Yüksel, 2008)

Fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) est un modèle qui détermine le niveau des comportements à risques en milieu de travail. Mesurer la sécurité dans les entreprises doit suivre une approche globale. En d'autres termes, les facteurs affectant la SST doivent être mesurés simultanément et d'une façon multidimensionnelle. Les facteurs affectant la sécurité du système de travail ont des structures non physiques. Par exemple, les facteurs comportementaux sont qualitatifs et ne peuvent pas être mesurés avec les méthodes traditionnelles. Ces facteurs sont évalués à l'aide de poids et de variables linguistiques flous. L'utilisation de nombres flous pour évaluer les facteurs de sécurité aidera à montrer le problème réel de manière plus réaliste. Dans ce modèle, la participation des employés est considérée comme une entrée importante pour la gestion réussie de la SST et la réduction des lésions professionnelles (Redinger et al., 2002).

h) Système de management santé sécurité environnement (SMSE) basé sur l'analyse floue de l'enveloppement des données (Azadeh et al., 2012).

Cet outil est un logiciel capable d'évaluer les performances des systèmes intégrés de gestion de la SST grâce à *fuzzy data envelopment analysis* (FDEA). Cette méthode proposée peut évaluer l'efficacité relative des SGSST en considérant simultanément plusieurs indicateurs d'entrée et de sortie. Il est également possible d'utiliser la logique floue pour gérer d'éventuelles erreurs humaines et l'ambiguïté des données. La théorie des ensembles flous et l'adoption de la méthode FDEA s'appliquent pour réduire l'erreur humaine et l'incertitude des indicateurs de qualité. En plus d'identifier les forces et les faiblesses des unités efficaces et inefficaces, cette méthode peut fournir des objectifs spécifiques pour chaque département et toute l'entreprise afin d'atteindre leur efficacité maximale. Ce logiciel aide les gestionnaires à identifier les forces et les faiblesses de leur SGSST et à assurer une amélioration en prévention dans l'entreprise.

- i) Model of safety performance specifically designed for the SMEs (Cagno et al., 2013).

Les modèles d'analyse quantitative ne peuvent pas être pleinement utilisés par les dirigeants et entrepreneurs des PME pour deux raisons principales. La première est qu'ils ne sont pas en mesure de fournir une image complète de tous les facteurs liés aux performances de sécurité. Deuxièmement, la relation entre les deux facteurs ne peut être examinée qu'indépendamment du contexte dans lequel cette relation a eu lieu. En raison des conditions de contexte des différentes industries, il est nécessaire d'inclure un nombre suffisant de facteurs de médiation dans le modèle pour montrer l'effet du contexte sur la relation entre les deux facteurs principaux. D'une part, les cadres existants pour démontrer les performances de sécurité d'une PME sont trop spécifiques et les facteurs sont organisés en une seule couche et ne représentent donc pas une chaîne de causes à effets. En revanche, les modèles existants ne prennent pas en compte les caractéristiques spécifiques des PME. Afin de répondre aux besoins des PME, ce modèle dépasse les limites des modèles existants généralement conçus pour les grandes entreprises. Les interventions réussies doivent être basées sur les facteurs qui ont le plus grand impact sur l'amélioration des performances de SST. La sélection des principaux facteurs d'intervention doit se faire au niveau micro.

Pour développer cet outil, une revue de la littérature a permis d'identifier tous les facteurs de SST liés aux PME en impliquant des experts. Dans l'étape suivante, en fonction des situations spécifiques, chaque entreprise peut choisir une intervention en fonction de différents niveaux de détail et de ses besoins. Une fois le niveau de détail établi, l'interaction de cause à effet entre les différents aspects est déterminée. L'outil d'analyse utilisé à cette étape est le modèle structurel interprétatif (MSI). Il s'agit d'un processus d'apprentissage assisté par ordinateur qui permet aux individus ou aux groupes de cartographier toutes les relations entre les différents éléments d'un système complexe.

L'idée principale d'un tel outil est de profiter des connaissances et de l'expérience acquises par les experts, de décortiquer le système en différents sous-systèmes, puis de

créer un modèle structurel à plusieurs niveaux. Cet outil fournit une hiérarchie qui permet de comprendre clairement les relations de cause à effet directes et indirectes entre les facteurs et décrire chaque facteur en fonction de trois niveaux de détail différents. Les outils mentionnés offrent aux organisations des approches structurées pour évaluer leurs performances en matière de SST, identifier les faiblesses et mettre en place des améliorations afin d'assurer des lieux de travail plus sûrs et plus sains. Le Tableau 1.5 présente une brève description de ces outils.

Tableau 1.5 Outils et méthodes d'évaluation de la performance en SST

Outil	Auteur	Avantages
Outil d'autodiagnostic et un modèle de progression de la mesure en SST	Roy et al. (2008)	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation d'indicateurs prédictifs pour démontrer les performances - Identification des comportements, procédures et processus à améliorer
La méthode des éléments de sécurité (SEM)	Alteren (1999)	<ul style="list-style-type: none"> - Identification des faiblesses des systèmes et pratiques de sécurité existants - Accord sur la situation actuelle et les objectifs internes - Visibilité de l'effort de gestion de la sécurité pour obtenir un engagement interne, faciliter la communication et contribuer à une image positive de la sécurité
Instrument d'évaluation universel (IEU)	Redinger et Levine (1998)	<ul style="list-style-type: none"> - Évaluation globale afin d'évaluation complète de la performance de la gestion du système de SST - Fournir une base solide et fiable pour l'évaluation de la SST - Précision et couverture étendue afin d'une évaluation approfondie et détaillée de la performance de la gestion de la SST - Adapté à des utilisateurs spécifiques qui ayant les connaissances et l'expertise nécessaires - Amélioration la performance de la gestion de la SST
Tripod Delta	Cambon et al. (2005)	<ul style="list-style-type: none"> - Garantit une approche basée sur l'expertise et les meilleures pratiques en matière de gestion de la SST. - Utilisation d'indicateurs de performances pour évaluer le système de gestion de la SST - Garantit une évaluation réaliste et pertinente des risques liés à la SST - Applicable à toutes les industries pour évaluer la gestion de la SST
Méthodes de contrôle qualité en SST	Roy et al. (2004)	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration des processus de santé et de sécurité - Compatibilité avec les normes de gestion de la qualité - Approches éprouvées de qualité - Documentation de l'efficacité
Nouveau modèle d'évaluation des risques pour les PME	Law et al. (2006)	<ul style="list-style-type: none"> - Intégration de modèles peu connus - Approche en plusieurs étapes - Utilisation de normes et de méthodes éprouvées - Hiérarchisation des risques améliorée - Meilleurs résultats comparés aux méthodes traditionnelles

Tableau 1. 6 Outils et méthodes d'évaluation de la performance en SST (suite)

Outil	Auteur	Avantages
Modèle FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process)	Dagdeviren et Yuksek (2008)	<ul style="list-style-type: none"> - Évaluation des comportements à risques en milieu de travail. - Approche globale de mesure de la sécurité. - Évaluation des facteurs comportementaux à l'aide de variables floues
Système de management santé sécurité environnement basé sur l'analyse floue de l'enveloppement des données	Azadeh et al. (2012)	<ul style="list-style-type: none"> - Évaluation des performances des systèmes de gestion de la SST - Utilisation de la logique floue pour gérer les erreurs humaines et l'ambiguïté des données - Identification des forces et des faiblesses des unités efficaces et inefficaces - Amélioration de la prévention dans l'entreprise
Modèle de performance en matière de sécurité pour les PME	Cagno et al.	<ul style="list-style-type: none"> - Adapté aux spécificités des PME - Hiérarchie claire des facteurs de sécurité - Permet aux dirigeants de choisir des interventions adaptées - Perspective claire et opérationnelle

CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIF DE RECHERCHE

Le but principal de ce chapitre est de détailler la problématique, ainsi que les objectifs de recherche. Il comporte trois sections principales. D'abord, la première section (2.1) cerne les trois éléments principaux du problème général traité. Ensuite, la deuxième section (2.2) détaille les objectifs de recherche. Enfin, la troisième section (2.3) formule les questions de recherche.

2.1 Problématique de recherche

2.1.1 Contraintes des PME manufacturières

L'industrie manufacturière est un secteur essentiel de l'économie canadienne (Huang, 2020). Ceci permet d'assurer la position du chef de file économique au Canada par rapport aux autres pays industrialisés. Au Québec, et malgré le déclin relatif observé au cours des dernières décennies, le secteur manufacturier demeure un pilier important de l'économie (Gouvernement du Canada, 2021). En 2019 au Canada, 88,3 % des établissements étaient PME, et l'industrie québécoise a toujours été caractérisée par une forte présence de PME (Gouvernement du Canada, 2021).

Les PME ont plus de problèmes de SST que les grandes entreprises (Breslin et al., 2010). Dans cette situation, profiter des expériences numériques et avoir des compétences et des connaissances techniques est une condition préalable pour la migration vers l'Industrie 4.0 (CEFRIO, 2016). Les PME qui se présentent comme des acteurs clés de l'industrie manufacturière québécoise éprouvent souvent de la difficulté à acquérir les compétences numériques nécessaires (STIQ, 2020; Kolla et al., 2019). Les contraintes budgétaires et humaines ainsi que la réticence causée par une méconnaissance du numérique freinent les PME (Torn et Vaneker, 2019).

De nombreux facteurs, comme la limite des ressources financières, le manque de main-d'œuvre qualifiée, la limite des connaissances et l'absence de sensibilisation quant à

l'intégration des technologies ainsi que les systèmes de gestion inadéquats et les problèmes de cybersécurité rendent difficile la transition des PME vers l'Industrie 4.0 (Kiel et al, 2017; Torn et Vaneker, 2019; MacEachen et al., 2010). La Figure 2.1 suivante montre les facteurs exprimés selon un sondage réalisé parmi 500 PME manufacturières situées au Québec de 10 à 500 employés (STIQ, 2020).

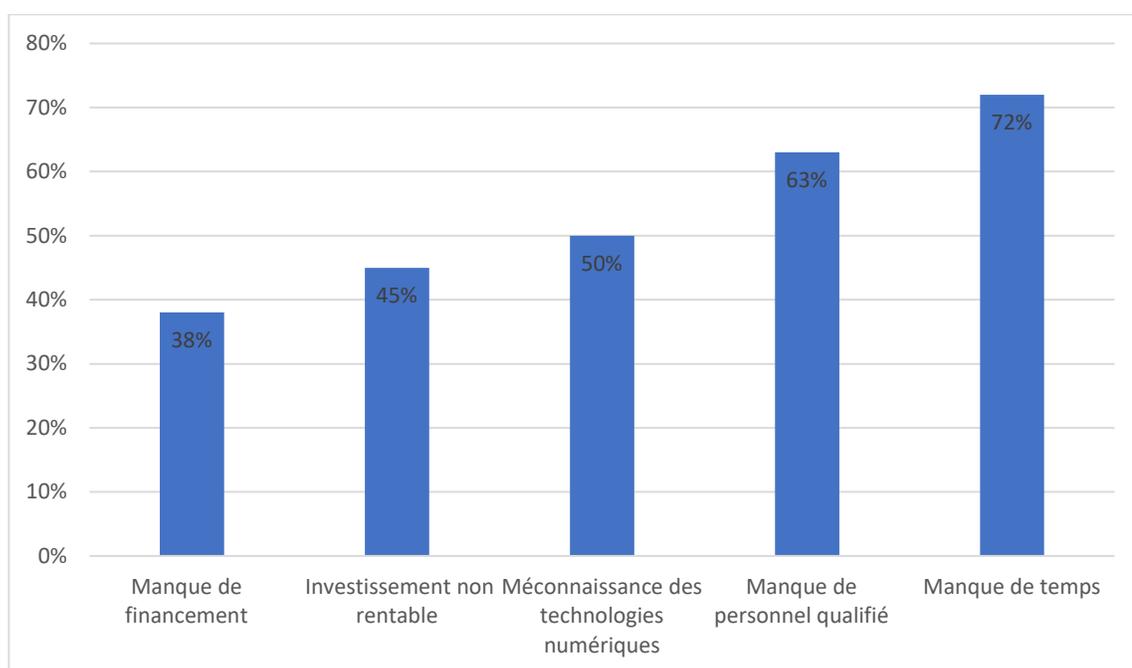


Figure 2.1 Freins à l'implantation des technologies l'Industrie 4.0 chez des PME

(STIQ, 2020)

D'un autre côté, les contraintes budgétaires conduisent les PME à ignorer la SST en raison du retour sur investissement à long terme (Hasle et Limburg, 2006). Le manque d'incitations en SST, l'absence d'exigences d'inspection, et le manque de réglementations adaptées aux nouvelles technologies font partie des facteurs affectant la gestion de la SST dans les PME (Legg et al., 2015; Masi et Cagno, 2015).

2.1.2 Risques émergents associés aux technologies de l'Industrie 4.0

L'évolution technologique apporte des changements majeurs dans le milieu manufacturier (Horváth et Szabó, 2019). L'Industrie 4.0 a révolutionné le secteur manufacturier avec l'intégration de nouvelles technologies telles que l'IOT et les cobots (Kolla et al., 2019; Torn et Vaneker, 2019; Thoben et al., 2017). Certaines de ces technologies auront des avantages et des défis en termes de SST (Alcácer et Cruz-Machado, 2019; Badri et al., 2018). Les changements technologiques dans le contexte de l'Industrie 4.0 nécessitent de compétences diversifiées, d'actualité et très spécialisées (Hébert et Moudallal, 2016). Cela modifiera les exigences d'embauche et la nature de la main-d'œuvre, ce qui entraînera de nouvelles menaces à la SST (BDC, 2017). L'interaction croissante des machines avec les humains entraîne des changements dans les méthodes de travail qui pourront causer de nouveaux risques en SST (Adem et al., 2020).

La numérisation et l'afflux de l'information provenant de sources multiples compliquent l'analyse des données (Alcácer et Cruz-Machado, 2019; Badri et al., 2018). La fiabilité des données et la manière de les utiliser doivent être considérées pour assurer la sécurité des travailleurs (Badri et al., 2018; Assante et al., 2016). Les données erronées, les critères inadéquats de sélection des données, le choix de modèles incorrects ou imprécis, la complexité des processus de gestion deviennent des facteurs de risques qui peuvent causer des lésions professionnelles (Aucourt, 2019; Agrafiotis et al., 2018; Badri et al., 2018).

La numérisation peut entraîner, entre autres, des risques ergonomiques dus aux nouvelles formes d'interactions homme-machine, des risques de cybersécurité dus à l'accès à distance aux équipements et aux installations, et des risques psychosociaux dus à l'évolution de la nature et de la cadence du travail (Adam et al., 2020; Badri et al., 2018; Zhaohao et al., 2018; IRSST, 2017). Il est donc plus important d'anticiper les risques émergents affectant la SST (Badri et al., 2018). Pour surmonter ces contraintes, les chercheurs, spécialiste et industriels doivent travailler ensemble pour développer des

stratégies basées sur une vision globale et évoluer de manière sécuritaire et contrôlée vers l'Industrie 4.0, en prévoyant les nouvelles menaces en SST.

2.1.3 Absence de normes ou de réglementations adaptées aux technologies l'Industrie 4.0

Les lois et règlements en SST ont été révisés au fil du temps à la suite, entre autres, d'événements majeurs. La plupart des exigences énoncées concernent l'inspection, l'audit et l'imposition de sanctions en cas de violation de la loi. Les législations actuelles en SST exigent que les entreprises identifient, contrôlent et éliminent les dangers à la source même, mais ne fournissent pas de cadre pour intégrer la SST dans les processus industriels (Ndjoulou, 2018).

L'évaluation des risques est une étape essentielle durant l'intégration des technologies de l'Industrie 4.0. Tout comme la 3^e révolution industrielle qui exigeait la mise en œuvre et l'adoption de réglementations adaptées en SST, l'Industrie 4.0 exige de nouvelles règles et normes pour s'accommoder à cette transformation (Aucourt, 2019). L'absence de révision de normes en réponse aux innovations des technologies de l'Industrie 4.0 peut influencer négativement la SST (Badri et al., 2018).

À l'instar des changements technologiques rapides qui caractérisent l'Industrie 4.0, de nombreuses interventions dans le domaine de la SST évoluent (BIT, 2019). Le cadre légal et réglementaire de SST au Québec est basé sur l'élimination des sources de danger ainsi que sur l'interdiction de l'accès aux pièces en mouvements tandis que l'interaction entre la machine et l'homme est à l'opposé de cette loi. Les normes existantes basées sur l'intégration et la coopération homme-machine devraient être examinées plus attentivement afin d'éviter de nuire à la sécurité au travail (IRSST, 2017).

La problématique de recherche peut être synthétisée en trois éléments essentiels. Ces éléments sont appuyés par le chapitre de la revue de la littérature.

La Figure 2.2 suivante présente les trois principaux éléments de la problématique et résume la problématique de recherche.

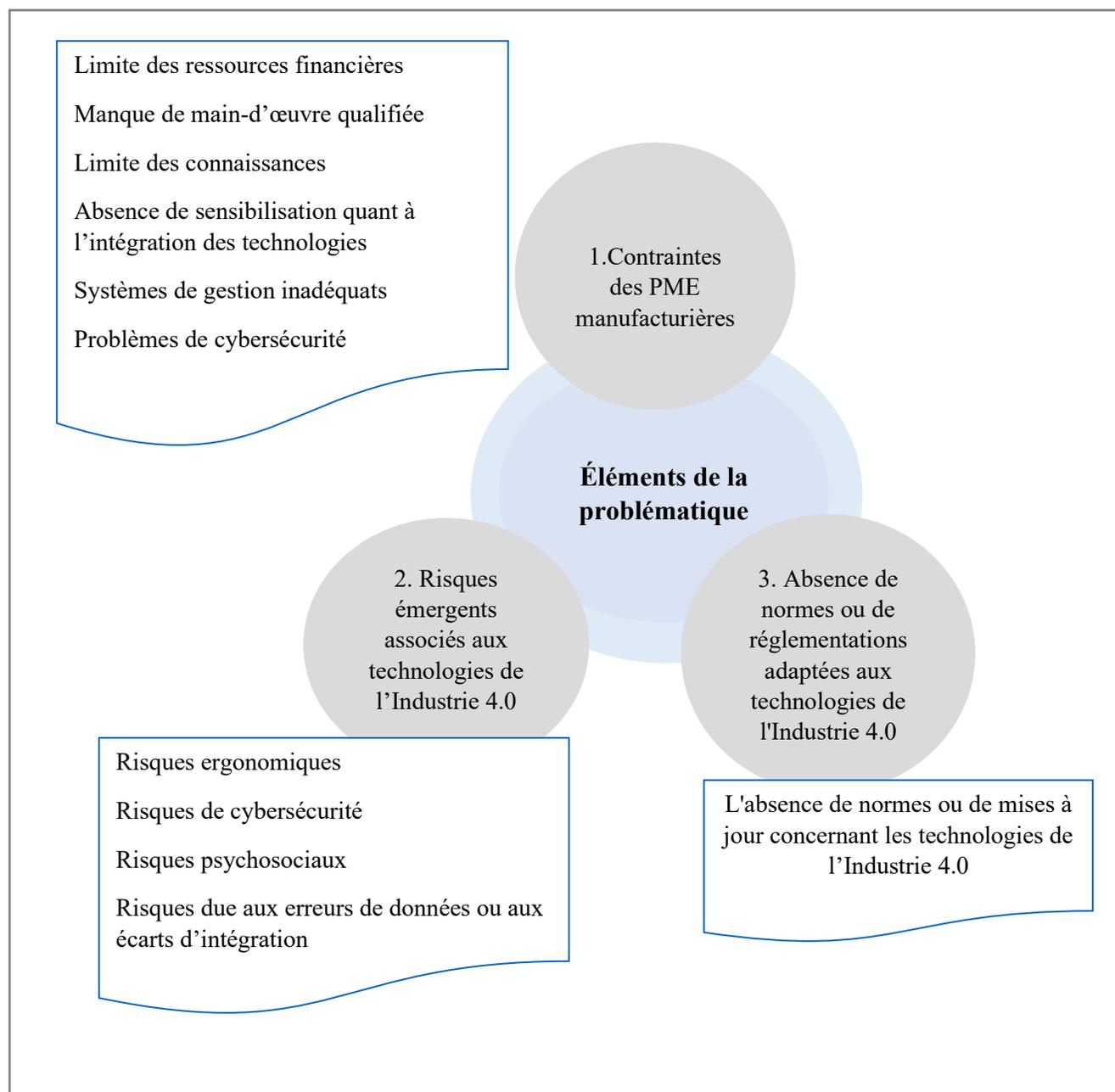


Figure 2.2 Principaux éléments de la problématique de recherche

2.2 Objectifs de recherche

L'objectif principal de ce chapitre est d'élaborer un portrait pratique des opportunités et des menaces potentielles des technologies de l'Industrie 4.0 en SST, dans le contexte de la transformation numérique des PME manufacturières.

Pour atteindre cet objectif, il est prévu d'atteindre deux objectifs spécifiques suivants :

- Élaboration d'une revue détaillée de la littérature afin de sortir avec un portrait initial des opportunités et menaces potentielles des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST (Portrait initial);
- Implication de PME québécoises afin de préciser le portail initial pour le rendre plus adapté à la réalité du secteur manufacturier (Portrait pratique).

2.3 Les questions de recherche

Durant ce travail de recherche, il est prévu de répondre aux questions suivantes liées aux objectifs de recherche :

- Quelles sont les technologies les plus utilisées dans l'Industrie 4.0?
- Quelles sont les opportunités et les menaces de ces technologies sur la SST que doivent les PME manufacturières prendre en considération afin de réussir leur transformation numérique?

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Le but principal de ce chapitre est de présenter la méthodologie de recherche mise en œuvre. Ce chapitre comporte quatre sections principales. D'abord, la première section (3.1) montre la démarche méthodologique adoptée. Ensuite, la deuxième section (3.2) expose le cadre théorique et les dernières sections (3.3, 3.4) détaillent le cadre pratique des étapes de l'approche méthodologique.

3.1 Démarche méthodologique de la recherche

En premier lieu, la démarche méthodologique met en évidence le cadre théorique. Ce cadre est dédié à l'identification des opportunités et des menaces en matière de SST des technologies de l'Industrie 4.0. Le tout est colligé dans un portrait initial.

En second lieu, la démarche méthodologique expose le cadre pratique constitué de deux étapes, soient : 1) la collecte des données en impliquant des PME afin de comparer le portail initial à la leur réalité dans un contexte industriel et 2) l'analyse des données collectées afin d'élaborer un portrait pratique des opportunités et menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST.

Enfin, quelques recommandations des PME manufacturières sont exposées afin de mieux protéger les travailleurs et mieux maîtriser leur transformation numérique, selon un point de vue SST.

La Figure 3.1 suivante détaille la démarche méthodologique adoptée dans le cadre de ce projet de recherche.

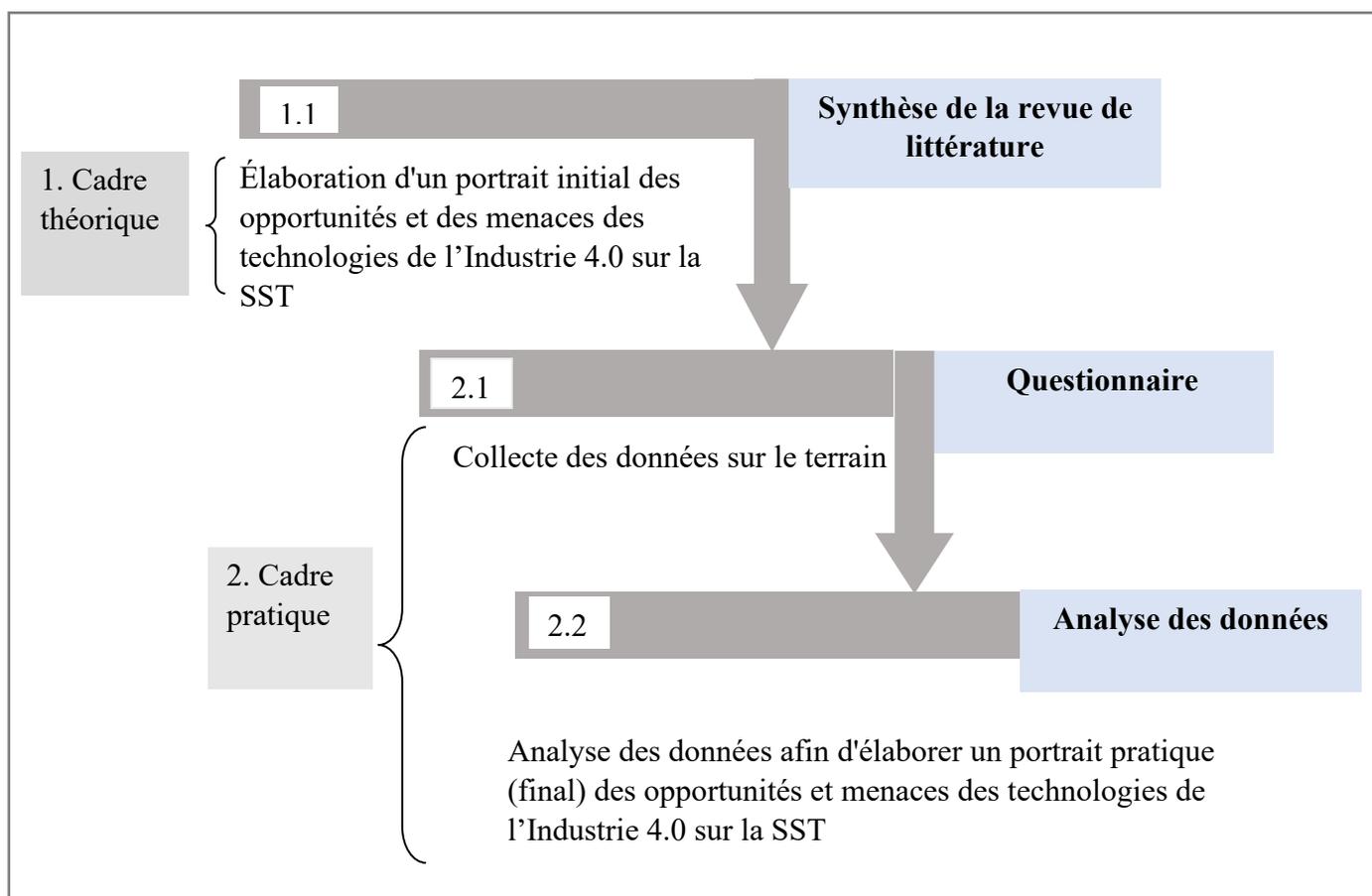


Figure 3.1 Illustration des étapes de la méthodologie

Il convient de noter que ce projet de recherche a été approuvé par le Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains (CÉRÊH) de l'UQTR. Un certificat d'éthique a été délivré le 21 avril 2022 (Annexe 1). Ce certificat a été requis avant de procéder au recrutement et à la collecte de données sur le terrain, auprès des PME manufacturières.

3.2 Élaboration d'un portrait initial des opportunités et des menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST

Un portrait initial des opportunités et des menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST a été élaboré sur la base des informations recueillies à partir de la revue de littérature (section 1.3.3).

La base de données telles que Google Scholar, Google, Science Direct, Scopus, le site web de l'IRSS et CNESTT ont été utilisés pour la recherche documentaire.

Parmi les mots clés utilisés en anglais et français, on cite : « Industrie 4.0 », « Industry 4.0 », « Manufacturing 4.0 », « Robotics », « Smart Factory » and « Advanced Manufacturing », « digitization », « Automation », « Mégadonnées », « Big data », « Intelligence artificielle », « Artificial intelligence », « Robotique collaborative (Cobotique) », « Collaborative robotics », « Simulation », « Internet of Things (IoT) », « Internet des objets », « Internet des services », « Internet of Services (IoS) », « Systèmes Cyber Physiques », « Cyber Physical Systems (CPS) », « Cloud computing », « Réalité augmentée », « Augmented reality », « Jumeaux numériques », « Digital twins », « Fabrication additive », « Additive manufacturing », « main d'oeuvre » et « human ». Ensuite, les mots-clés « PME », « SME », « Manufacturière » ont été combinés par « Et » ou « AND » avec les autres mots clés. Enfin, les mots-clés précédents sont combinés avec « santé et sécurité du travail (SST) » ou « Occupational health and safety (OHS) ».

Parmi les documents trouvés et inclus, on cite les articles publiés dans des revues scientifiques, les articles de conférences, les rapports de recherche, les normes, les règlements et les documents législatifs.

Afin de ne pas exclure d'importants travaux, des recherches axées sur les technologies de l'Industrie 4.0 et la SST ont été prises en compte. Cependant, les documents reliés à la santé publique ont été négligés.

3.3 Collecte des données

3.3.1 Choix et description de l'échantillon

Les PME éligibles à collaborer à ce projet de recherche doivent avoir un nombre d'employés inférieur à 500 et doivent œuvrer dans le secteur manufacturier du Québec. Les PME situées dans les régions de la Mauricie et du Centre-du-Québec, de l'Estrie, de

Montréal et de l'Abitibi-Témiscamingue ont été ciblées, car ces quatre régions ont les plus fortes concentrations de PME manufacturières. Les 400 PME visées sont réparties en plusieurs secteurs de production, dont : la production de papier, les produits métalliques, la machinerie, l'habillement, les produits en plastique et les produits alimentaires.

3.3.2 Élaboration du questionnaire

Le questionnaire (Annexe 2) a été essentiellement élaboré à partir du Portrait initial des opportunités et menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST (voir : 1.3.3). Le questionnaire comporte six sections, soit : les caractéristiques de l'entreprise, les informations sur le répondant, les questions sur la prise en charge de la SST, les questions sur la mise en œuvre de l'Industrie 4.0 et la présence des opportunités et des menaces en SST lors de l'utilisation des technologies de l'Industrie 4.0. En tout, le questionnaire comporte 110 questions. Le répondant devait cocher une ou plusieurs réponses dans une liste à choix proposée. Dans certains cas, le répondant a été amené à appuyer son choix par des explications.

Pour simplifier le remplissage et inciter davantage les PME à retourner leurs questionnaires complétés, les questions ont été de types fermés. En raison de la nature des questions à choix multiples, les réponses binaires « oui ou non » et une échelle de Likert avec trois niveaux sont prises en compte.

Le questionnaire a été élaboré selon un format électronique à l'aide d'une application informatique propre à l'UQTR (Banque interactive de questions). Avant de répondre au questionnaire, le répondant est tenu de lire attentivement le formulaire d'information et de consentement associé au projet (Annexe 3) et après acceptation, il est redirigé par un lien Internet menant au questionnaire. Le temps estimé pour répondre au questionnaire est d'environ 30 minutes.

3.3.3 Validation du questionnaire

Le questionnaire préparé a été envoyé à un membre de l'équipe de recherche. Il a été choisi pour identifier les défauts de la plateforme, s'assurer de la clarté du questionnaire et de fournir plus de détails sur le temps qu'il faudra pour le remplir. Par la suite, plusieurs modifications ont été apportées au questionnaire initial. Pour le deuxième test, le questionnaire a été envoyé à des personnes extérieures de l'UQTR pour s'assurer du bon fonctionnement de la plateforme en ligne.

3.3.4 Envoi du questionnaire

Le projet a été présenté et expliqué aux répondants potentiels des PME par le biais d'appels téléphoniques auprès de 400 PME manufacturières ciblées. Généralement, le contact a été pris avec le service des ressources humaines ou un gestionnaire de la SST de l'entreprise. Après cet appel téléphonique, 106 PME ont exprimé leur accord préliminaire à participer et ont fourni leurs adresses courriel pour recevoir ce questionnaire. Plusieurs entreprises n'ont pas voulu participer pour diverses raisons telles que le manque d'intérêt, le manque de temps ou le manque de familiarité avec le sujet de recherche.

Lorsqu'il s'est avéré que le nombre de répondants ayant rempli et soumis le questionnaire stagnait, des rappels ont été effectués par courriel et par téléphone. Lors de ces relances, plusieurs nouvelles PME ont accepté de participer à ce projet et ont fourni leurs adresses courriel.

3.4 Analyse des données afin d'élaborer un portrait pratique des opportunités et menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST

En premier lieu, les 48 questionnaires reçus ont été vérifiés afin de s'assurer que les réponses reçues sont complètes. Parmi ceux-ci, 32 questionnaires complétés ont été retenus pour l'analyse des données, tandis que les 16 questionnaires avec des réponses

incomplètes ont été rejetés. En second lieu, ces données ont été regroupées suivant les six familles de questions et les réponses ont été analysées en fonction de cette décomposition.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Le but principal de ce chapitre est de présenter et de discuter les résultats de la recherche. Ce chapitre comporte sept sections principales. D'abord, la section 4.1 présente les caractéristiques des 32 entreprises ayant répondu intégralement au questionnaire. Ensuite, la section 4.2 présente quelques informations sur les répondants. Ensuite, les sections 4.3 à 4.6 détaillent les résultats bruts pour chaque famille de questions (la prise en charge de la SST, la mise en œuvre de l'Industrie 4.0, les opportunités des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST et les menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST). Enfin, la section 4.7 discute en détail les résultats obtenus par famille de questions, selon le questionnaire.

4.1 Résultats relatifs aux caractéristiques de l'entreprise

La famille « Caractéristiques de votre entreprise » dans le questionnaire regroupe cinq questions principales (Annexe 2, section 1).

Environ 41 % des PME interrogées opèrent dans le secteur de produits de consommation et 34 % d'entre elles opèrent dans le secteur des ressources naturelles et le reste fait partie du secteur de transformation complexe. Environ 47 % des PME consultées comptent 20 à 49 employés. 22 % des PME comptent 50 à 99 employés. 25 % des PME comptent 100 à 299 employés. Les 6 % des PME restantes comptent 300 à 499 employés. La plupart des PME (25 %) ont un chiffre d'affaires compris entre 5 et 14 M\$. La majorité de ces PME (84 %) affirment avoir une personne-ressource en SST. Parmi ces personnes, 81 % gèrent la SST à temps partiel.

Le Tableau 4.1 présente les résultats pour la famille des caractéristiques de l'entreprise.

Tableau 4.1 Résultats pour la famille des caractéristiques de l'entreprise

Caractéristiques de l'entreprise	Détails des questions	Nombre des PME	%	
Secteur manufacturier	Ressources naturelles	11	34	
	Produits de consommation	13	41	
	Transformation complexe	8	25	
		Total	100 %	
Taille de la PME	20 à 49	15	47	
	50 à 99	7	22	
	100 à 299	8	25	
	300 à 499	2	6	
		Total	100 %	
Chiffre d'affaires annuel moyen de la PME	Inférieur à 1 M\$	3	9	
	Entre 1 et 4 M\$	5	16	
	Entre 5 et 14 M\$	8	25	
	Entre 15 et 29 M\$	7	22	
	Entre 30 et 49 M\$	7	22	
	Plus de 50 M\$	2	6	
		Total	100 %	
Une personne dans l'entreprise qui gère la SST	Oui	27	84	
	Non	5	16	
			Total	100 %
	Type de régime			
	À temps partiel	22	81	
	À temps complet	5	19	
			Total	100 %

4.2 Quelques informations sur les répondants

La famille « Quelques informations sur les répondants » dans le questionnaire regroupe quatre questions principales (Annexe 2, section 2).

Seulement 25 % des répondants sont des coordonnateurs de SST. Le reste des répondants occupent des fonctions non reliées à la SST. Ils sont des professionnels des ressources humaines (RH) (37,5 %), des directeurs de l'ingénierie (6,25 %), des directeurs adjoints

(9,3 %), des directeurs administratifs (9,3 %), des propriétaires (6,25 %) et des membres de la direction générale (6,25 %).

Environ 69 % de ces 32 répondants ont indiqué qu'ils ont reçu une formation en SST.

Environ 59 % des répondants travaillent dans leurs entreprises depuis 1 à 3 ans. La plupart d'entre eux (47 %) ont un diplôme de baccalauréat de premier cycle. Deux des répondants ont déclaré qu'ils avaient un certificat en SST cumulé avec un diplôme d'études secondaires.

Le Tableau 4.2 suivant présente les informations sur les répondants.

Tableau 4.2 Quelques informations sur les répondants

Caractéristiques de l'entreprise	Détails des questions	Nombre des PME	%
Fonction du répondant dans l'entreprise	Coordonnateur SST	8	25
	Membre de RH (Directeur, responsable, coordonnateur, etc.)	12	38
	Directeur de l'ingénierie	2	6
	Directeurs adjoints	3	9,5
	Directeur administratif	3	9,5
	Professionnel de la direction générale (président, adjoint, etc.)	2	6
	Propriétaire de l'entreprise	2	6
	Total		100 %
Durée du travail dans l'entreprise actuelle	1 à 3 ans	19	59,37
	4 à 6 ans	9	28,12
	7 à 9 ans	2	6,25
	Plus de 10 ans	2	6,25
	Total		100 %
Niveau scolaire	Collégial	10	31
	Baccalauréat	15	47
	Maîtrise	5	16
	Doctorat	0	0
	Certificat en SST	1	3
	Secondaire	1	3
	Total		100 %
Formation en SST	Oui	22	69
	Non	10	31
		Total	100 %

4.3 Résultats relatifs à la prise en charge de la SST

La famille « Votre prise en charge de la SST » dans le questionnaire regroupe six questions principales (Annexe 2, section 3).

Environ 69 % des répondants affirment qu'ils analysent les risques de SST dans leurs entreprises. Cette analyse se réalise chaque fois qu'un nouveau procédé ou équipement est introduit (44 %) ou, chaque fois qu'il y a un changement de procédés, d'outils ou de machines (44 %). La majorité des PME (97 %) disposent d'un registre pour les accidents de travail survenus. Le nombre des accidents de travail déclarés depuis 5 ans dans ces entreprises totalise 1551 cas.

La plupart des accidents de travail ont causé différentes blessures (61 %). La répartition des PME ayant cité des exemples de sources de dangers dans l'environnement de travail est la suivante :

- 27 % causés par des dangers mécaniques (éléments en mouvement, écrasement ou coincement par élément mobile, etc.);
- 9 % causés par des dangers électriques (électricité à courant continu ou alternatif, électricité statique, etc.);
- 15 % causés par des dangers physiques et chimiques (milieu poussiéreux ou restreint, ambiance sonore, éléments sous-pression, etc.);
- 20 % causés par des méthodes de travail (tâches à risques, tâches répétitives, etc.);
- 24 % causés par des dangers humains (comportements à risque, erreurs humaines, etc.);
- 5 % causés en raison de contraintes réglementaires (absences de normes ou de lois, normes anciennes non adaptées, etc.).

La Figure 4.1 suivante présente la répartition des sources de dangers dans l'environnement de travail.

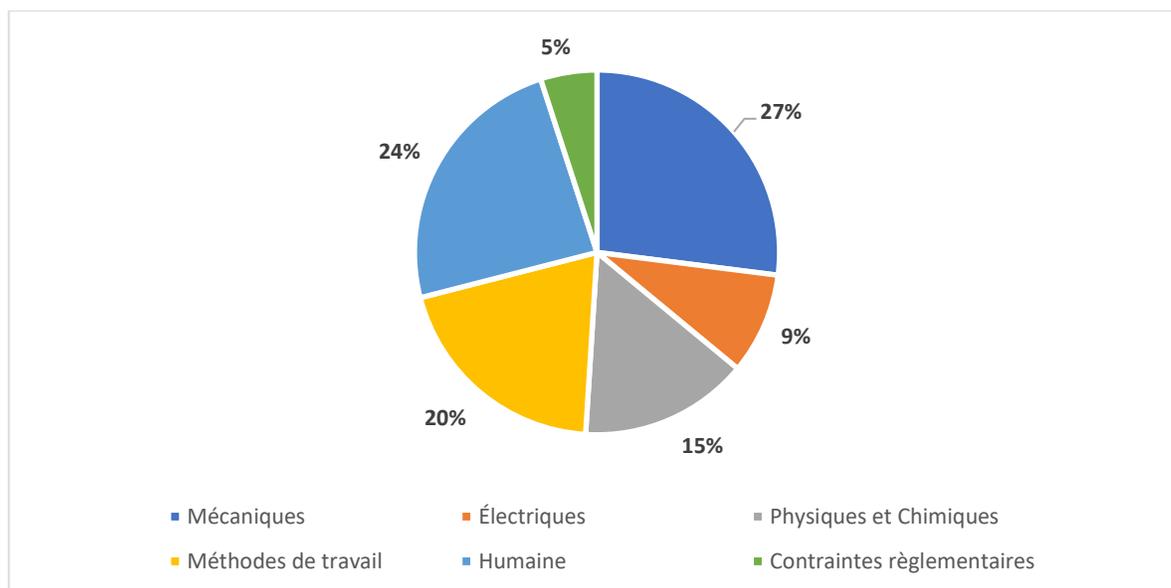


Figure 4.1 Répartition des sources de dangers survenues dans les PME consultées

Le Tableau 4.3 suivant présente les résultats de prise en charge de la SST.

Tableau 4.3 Prise en charge de la SST

Prise en charge de la SST	Détails des questions	Nombre des PME	%
Analyse de risque en SST	Oui	22	69
	Non	10	31
	Total		100 %
Moment de réaliser les analyses de risques en SST	Chaque fois qu'un nouveau procédé ou équipement est introduit	14	43,7
	Chaque fois qu'il y a un changement de procédés, d'outil, de machines, etc.	14	43,7
	Chaque fois qu'il y a une modification de l'aménagement interne	4	12,5
	Total		100 %
Registre des accidents de travail	Oui	31	97
	Non	1	3
	Total		100 %

Tableau 4.3 Prise en charge de la SST (suite)

Prise en charge de la SST	Détails des questions	Nombre des PME	%
Nombre de cas d'accidents déclarés depuis 5 ans	Une moyenne de 49 cas		
Types d'accidents survenus	Blessures (fracture, coupure, amputation, par le bruit, etc.)	31	63
	Brûlures (électrique, chimique ou par la chaleur)	12	24
	Explosions	0	0
	Chocs électriques	3	6
	Décès	0	0
	Malaise cardiaque	1	2
	Piqûres tiques (GDG Environnement)	1	2
	Entorses lombaires	1	2
	Total	100 %	

4.4 Résultats relatifs à la mise en œuvre de l'Industrie 4.0

La famille de « Mise en œuvre de l'Industrie 4.0 » dans le questionnaire regroupe dix questions principales (Annexe 2, section 4).

Environ 41 % des PME confirment que la mise en œuvre de l'Industrie 4.0 dans leurs entreprises est encore en développement. Seulement 25 % de PME ont déjà investi dans la mise en œuvre de stratégies liées à l'Industrie 4.0. 50 % de ces investissements sont dans le secteur de la production et de la fabrication. Parmi les autres PME qui n'ont pas déjà investi dans l'une des stratégies de l'Industrie 4.0, 72 % pensent qu'ils investiront dans des projets futurs. 22 % des PME dans 1 à 2 ans, 39 % des PME dans 3 à 5 ans et 39 % des PME dans plus de 5 ans ont prévu d'investir dans des technologies de l'Industrie 4.0.

Environ 40 % des répondants affirment que leurs entreprises bénéficient ou prévoient bénéficier des concepts liés aux opérations intelligentes (processus de fabrication qui

réagissent de manière autonome/automatique et en temps réel aux changements des conditions de production).

La répartition des PME qui ont évalué les compétences spécifiques de leurs employés face à l'Industrie 4.0 est la suivante :

- 63 % déclarent que les compétences du personnel en matière de l'infrastructure informatique sont existantes, mais insuffisantes;
- 69 % déclarent que les compétences des employés en matière de la technologie d'automatisation sont existantes, mais insuffisantes;
- 63 % déclarent que les compétences du personnel en matière de l'analyse des données sont existantes, mais insuffisantes;
- 50 % déclarent que les compétences des employés en matière de sécurité des données et des communications sont existantes, mais insuffisantes;
- 53 % déclarent que les employés n'ont pas les compétences nécessaires pour développer des systèmes d'assistance;
- 53 % déclarent que les compétences des employés en matière des logiciels de collaboration sont existantes, mais insuffisantes;
- 69 % déclarent que les compétences non techniques des employés, telles que la compréhension générale des systèmes et des processus, sont existantes, mais insuffisantes.

La Figure 4.2 suivante présente le détail des compétences spécifiques des employés par rapport à l'Industrie 4.0 dans les PME consultées.

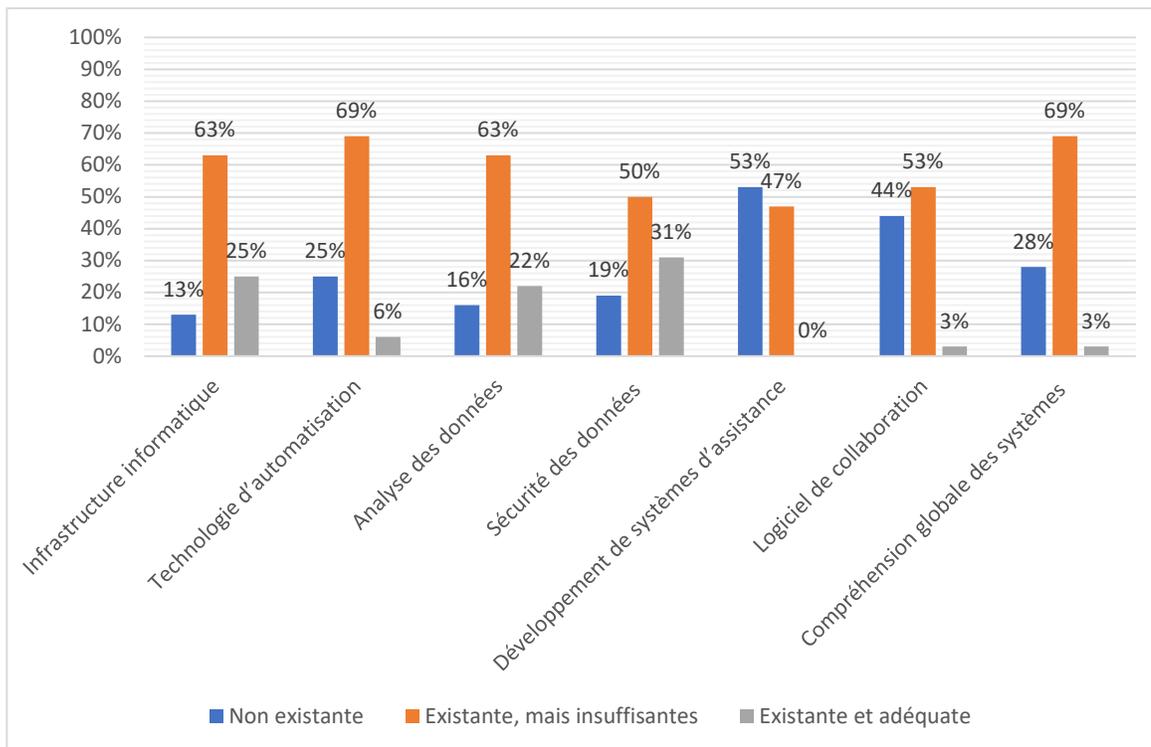


Figure 4.2 Répartition des compétences spécifiques de l'Industrie 4.0

Seulement 25 % des PME ont déjà utilisé les technologies de l'Industrie 4.0 dans l'entreprise, soient : l'infonuagique avec 63 %, les mégadonnées avec 38 %, l'IA et la robotique collaborative et l'IoT, l'IoS et les CPS avec 25 % chacun et les jumeaux numériques et la FA avec 13 %.

La Figure 4.3 suivante présente la répartition des technologies de l'Industrie 4.0 utilisées actuellement par les PME consultées.

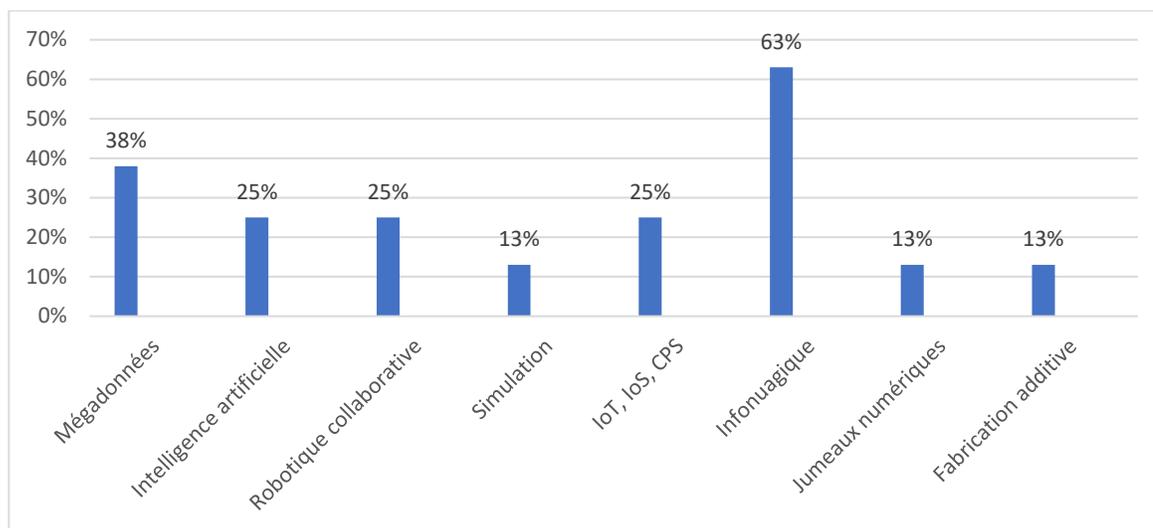


Figure 4.3 Répartition des technologies de l'Industrie 4.0 utilisées par les PME consultées

Les technologies de l'Industrie 4.0, qui seront ou qui continueront d'être utilisées dans les PME à l'avenir, sont : la robotique collaborative avec 22 %, l'infonuagique, l'IoT et l'IoS avec 18 %, la FA avec 11 %, la simulation avec 9 %, l'IA avec 8 %, la mégadonnées avec 7 %, les CPS avec 5 % et la RA avec 1 %.

La Figure 4.4 suivante présente la répartition des technologies de l'Industrie 4.0 que les PME utiliseront ou continueront d'utiliser à l'avenir.

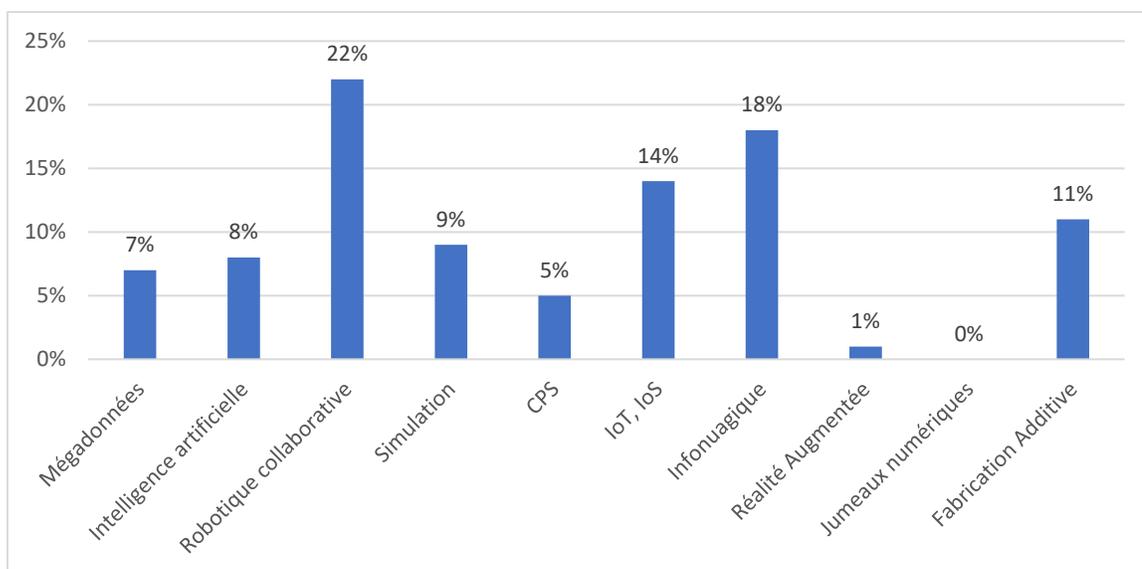


Figure 4.4 Répartition des technologies de l'Industrie 4.0 actuellement utilisées ou à utiliser dans l'avenir par les PME consultées

Le Tableau 4.4 suivant présente les résultats liés à la mise en œuvre de l'Industrie 4.0 dans les PME.

Tableau 4. 4 Mise en œuvre de l'Industrie 4.0

Mise en œuvre de l'Industrie 4.0	Détails des questions	Nombre des PME	%
Niveau de mise en œuvre de l'Industrie 4.0	Aucune stratégie n'existe	10	31
	Initiatives pilotes lancées	6	19
	Stratégie en développement	13	41
	Stratégie définie	1	3
	Stratégie définie et mise en œuvre	2	6
		Total	100 %
Investissement pour mettre en œuvre les stratégies de l'Industrie 4.0	Oui	8	25
	Non	24	75
		Total	100 %
		Oui	
Secteurs ou services investis dans les stratégies de l'Industrie 4.0	Recherche et développement	2	17
	Production/Fabrication	6	50
	Achat	0	0
	Logistique	1	8
	Ventes	0	0
	Service	1	8
	Technologie de l'information	2	17
		Total	100 %
		Non	
Investissement dans les futures stratégies d'investissement de l'Industrie 4.0	Oui	23	72
	Non	9	28
		Total	100 %
Durée prévue de ces projets d'investissement	1 à 2 ans	5	22
	3 à 5 ans	9	39
	5 ans et plus	9	39
		Total	100 %
Concepts de l'Industrie 4.0	Usine intelligente	11	23
	Opérations intelligentes	19	40
	Produits intelligents	1	2
	Cueillette et utilisation des données	16	34
		Total	100 %
Utilisation des technologies de l'Industrie 4.0 dans l'entreprise	Oui	8	25
	Non	24	75
		Total	100 %

4.5 Résultats relatifs aux opportunités des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST

La famille des opportunités des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST dans le questionnaire regroupe huit questions principales en lien avec chacune des technologies de l'Industrie 4.0 (Annexe 2, section 5).

La majorité des répondants (72 %) confirment que les mégadonnées et l'infonuagique aident à prendre des décisions rapides. La plupart des répondants (75 %) déclarent que les mégadonnées et l'infonuagique amélioreront les performances. Seulement 56 % des répondants soulignent que les mégadonnées et l'infonuagique augmentent la sécurité et la stabilité du système. Près de 56 % des répondants affirment que les mégadonnées et l'infonuagique sont capables d'analyser les comportements individuels et d'identifier les comportements à risque. Environ 66 % des répondants précisent que les mégadonnées et l'infonuagique sont capables de prédire les erreurs du système avant qu'elles ne deviennent un danger. Environ la moitié des répondants (56 %) rapportent que les mégadonnées et l'infonuagique sont capables de gérer les risques professionnels du système.

Le Tableau 4.5 suivant présente les résultats reliés aux opportunités de mégadonnées et de l'infonuagique répertoriées sur la SST.

Tableau 4. 5 Opportunités de mégadonnées et de l'infonuagique sur la SST

Opportunités	Détails des questions	Nombre des PME	%
Aide à une prise de décision rapide	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	9	28
	En accord	23	72
		Total	100 %
Aide à l'amélioration des performances	En désaccord	1	3
	Ni en accord ni en désaccord	7	22
	En accord	24	75
		Total	100 %
Aide à l'augmentation de la sécurité et de la stabilité du système	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	14	44
	En accord	18	56
		Total	100 %
Capable d'analyser le comportement des individuels et d'identifier les comportements à risques	En désaccord	1	3
	Ni en accord ni en désaccord	13	41
	En accord	18	56
		Total	100 %
Capable de prédire les erreurs du système avant qu'elles ne deviennent un danger	En désaccord	3	9
	Ni en accord ni en désaccord	8	25
	En accord	21	66
		Total	100 %
Capable de gérer les risques professionnels du système	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	14	44
	En accord	18	56
		Total	100 %

La plupart des répondants (84 %) affirment que l'IA contribue à améliorer l'efficacité des programmes de formation. La majorité des répondants (81 %) conviennent que l'IA est capable de prendre des décisions pertinentes en temps réel. Près de 56 % des répondants accordent que l'IA aide à la reconnaissance rapide des dangers. Environ 69 % des répondants ont déclaré que l'IA peut évaluer les risques. Seulement 50 % des répondants précisent que l'IA aide à l'identification des risques psychosociaux en temps réel. La

majorité des répondants (72 %) soulignent que l'AI est efficace pour identifier les anomalies des réseaux informatiques afin de réduire l'impact des cyberattaques.

Le Tableau 4.6 suivant présente les résultats reliés aux opportunités d'IA répertoriées sur la SST.

Tableau 4.6 Opportunités de l'intelligence artificielle sur la SST

Opportunités	Détails des questions	Nombre des PME	%
Aide à l'amélioration de l'efficacité des programmes de formation	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	5	16
	En accord	27	84
		Total	100 %
Capable de prendre des décisions en temps réel	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	6	19
	En accord	26	81
		Total	100 %
Aide à la reconnaissance rapide des dangers	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	11	34
	En accord	21	66
		Total	100 %
Capable d'évaluer les risques	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	10	31
	En accord	22	69
		Total	100 %
Aide à l'identification des risques psychosociaux en temps réel	En désaccord	2	6
	Ni en accord ni en désaccord	14	44
	En accord	16	50
		Total	100 %
Aide à la détection des anomalies du réseau afin de réduire l'impact des cyberattaques	En désaccord	2	6
	Ni en accord ni en désaccord	7	22
	En accord	23	72
		Total	100 %

Environ 81 % des répondants soulignent que la robotique collaborative aide à éliminer les tâches répétitives, difficiles et dangereuses et à créer un environnement ergonomique. Près

de 66 % des répondants conviennent que la robotique collaborative est capable d'interagir de manière plus flexible et indépendante avec les humains ainsi que les robots.

Le Tableau 4.7 suivant présente les résultats liés aux opportunités de robotique collaborative répertoriées sur la SST.

Tableau 4.7 Opportunités de robotique collaborative sur la SST

Opportunités	Détails des questions	Nombre des PME	%
Aide à l'élimination des tâches répétitives, ardues et dangereuses et à la création d'un environnement ergonomique	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	6	19
	En accord	26	81
		Total	100 %
Capable d'interagir de manière plus flexible et indépendante avec les humains ainsi que les robots	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	11	34
	En accord	21	66
		Total	100 %

La majorité des répondants (72 %) précisent que la simulation aide à prévenir les risques par l'estimation de la probabilité et de la gravité des dangers liés aux machines et aux travailleurs dans différents scénarios industriels. La plupart des répondants (72 %) affirment que la simulation minimise les risques de production, le stress et la perte de temps liés au travail, en anticipant les effets des changements dans les processus de production. Environ 69 % des répondants ont déclaré que la simulation aide à concevoir des processus plus ergonomiques, sécuritaires et pratiques pour la main-d'œuvre.

Le Tableau 4.8 suivant présente les résultats liés aux opportunités de la simulation en lien avec la SST.

Tableau 4.8 Opportunités de la simulation sur la SST

Opportunités	Détails des questions	Nombre des PME	%
Aide à la prévention des risques par l'estimation de la probabilité et de la gravité des dangers liés aux machines et aux travailleurs dans différents scénarios	En désaccord	1	3
	Ni en accord ni en désaccord	8	25
	En accord	23	72
		Total	100 %
Aide à minimiser les risques de production, le stress et la perte de temps liés au travail en anticipant les effets des changements dans les processus de production	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	9	28
	En accord	23	72
		Total	100 %
Aide à réaliser des processus plus ergonomiques, sécuritaires et pratiques pour la main-d'œuvre	En désaccord	1	3
	Ni en accord ni en désaccord	10	31
	En accord	21	66
		Total	100 %

Seulement 50 % des répondants confirment que l'IoT, l'IoS et les CPS sont capables de détecter les risques avant qu'ils ne surviennent. Environ 59 % des répondants ont déclaré que l'IoT, l'IoS et les CPS aident à réduire les effets physiologiques en lien avec les tâches répétitives et difficiles. Parmi les répondants, 66 % soulignent que l'IoT, l'IoS et les CPS sont efficaces pour contrôler et améliorer les performances des équipements de protection intelligents, individuels ou collectifs. Près de 66 % des répondants conviennent que l'IoT, l'IoS et les CPS sont capables de collecter des métadonnées, de stocker et d'évaluer de grands volumes de données liées à la SST en temps réel. La plupart des répondants (66 %) précisent que l'IoT, l'IoS et les CPS aident à identifier les erreurs grâce à une communication en temps réel entre les machines.

Le Tableau 4.9 suivant présente les résultats reliés aux opportunités l'IoT, IoS et CPS répertoriées sur la SST.

Tableau 4.9 Opportunités de l'Internet des objets ou des services et des systèmes cyberphysiques sur la SST

Opportunités	Détails des questions	Nombre des PME	%
Peut détecter les dangers avant qu'ils ne surviennent	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	16	50
	En accord	16	50
		Total	100 %
Aide à la réduction des effets physiologiques des travaux répétitifs et lourds	En désaccord	2	6
	Ni en accord ni en désaccord	11	34
	En accord	19	59
		Total	100 %
Aide au contrôle et à l'amélioration des performances des équipements intelligents de protection individuelle ou collective	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	11	34
	En accord	21	66
		Total	100 %
Capable de collecter des métadonnées, de sauvegarder et d'évaluer un grand volume de données reliées à la SST en temps réel	En désaccord	1	3
	Ni en accord ni en désaccord	10	31
	En accord	21	66
		Total	100 %
Aide à détecter les erreurs grâce à la communication en temps réel entre les machines	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	11	34
	En accord	21	66
		Total	100 %

La majorité des répondants (69 %) rapportent que la RA aide à collecter des données en temps réel sur le lieu de travail. Près de 59 % des répondants affirment que la RA est capable d'identifier les zones dangereuses, les scénarios à risques et d'évaluer les risques en temps réel à l'aide d'algorithmes basés sur les données. Environ 66 % des répondants pensent que la RA contribue à améliorer les performances des équipements de protection individuelle grâce à la capacité de recueillir des informations environnementales en temps réel. La plupart des répondants (78 %) déclarent que la RA peut prévenir les risques en améliorant les programmes de formation. La plupart des répondants (75 %) conviennent

que la RA est en mesure de fournir les instructions nécessaires pour améliorer la précision lors de la maintenance des équipements et réduire ainsi les erreurs évitables.

Le Tableau 4.10 suivant présente les résultats reliés aux opportunités de la RA répertoriées sur la SST.

Tableau 4.10 Opportunités de la réalité augmentée sur la SST

Opportunités	Détails des questions	Nombre des PME	%
Aide à la collecte de données en temps réel sur le lieu de travail	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	10	31
	En accord	22	69
		Total	100 %
Capable d'identifier les zones dangereuses, les scénarios de risques et l'évaluation des risques en temps réel à l'aide d'algorithmes basés sur des données	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	13	41
	En accord	19	59
		Total	100 %
Aide à améliorer la performance des équipements de protection individuelle grâce à la capacité de recueillir des informations environnementales en temps réel	En désaccord	1	3
	Ni en accord ni en désaccord	10	31
	En accord	21	66
		Total	100 %
Capable d'améliorer les programmes de formation et éviter les risques	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	7	22
	En accord	25	78
		Total	100 %
Capable de fournir les instructions nécessaires pour améliorer la précision lors de la maintenance et réduire les erreurs évitables	En désaccord	1	3
	Ni en accord ni en désaccord	7	22
	En accord	24	75
		Total	100 %

Plus de la moitié des répondants (63 %) rapportent que les jumeaux numériques sont capables de mettre à jour simultanément les mouvements des personnes et des équipements pour éviter les erreurs. Environ 69 % des répondants affirment que les

jumeaux numériques peuvent analyser l'ergonomie des tâches, bien répartir et assigner des tâches et fournir une meilleure localisation des équipements. Près de 69 % des répondants confirment que les jumeaux numériques sont capables de simuler des environnements à haut risque afin d'identifier les risques et les effets secondaires de l'environnement réel. Environ 69 % des répondants déclarent que les jumeaux numériques aident les opérateurs à s'entraîner sur une machine virtuelle sans risque pour eux-mêmes ou pour l'appareil. Plus de la moitié des répondants (59 %) mentionnent que les jumeaux numériques sont capables de détecter immédiatement les écarts entre les performances du modèle existant et le système physique réel.

Le Tableau 4.11 suivant présente les résultats liés aux opportunités de jumeaux numériques répertoriées sur la SST.

Tableau 4.11 Opportunités de jumeaux numériques sur la SST

Opportunités	Détails des questions	Nombre des PME	%
Capable de mettre à jour simultanément les mouvements des humains et des équipements pour éviter les erreurs	En désaccord	2	6
	Ni en accord ni en désaccord	10	31
	En accord	20	63
		Total	100 %
Capable d'analyser l'ergonomie des travailleurs, d'attribuer des tâches et de mieux localiser	En désaccord	1	3
	Ni en accord ni en désaccord	9	28
	En accord	22	69
		Total	100 %
Capable de simuler les environnements à risque afin d'identifier les dangers et les effets secondaires de l'environnement réel	En désaccord	2	6
	Ni en accord ni en désaccord	8	25
	En accord	22	69
		Total	100 %
Aide les opérateurs à se former sur une machine virtuelle sans risques pour eux-mêmes et pour la machine	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	10	31

Tableau 4.11 Opportunités de jumeaux numériques sur la SST (suite)

Opportunités	Détails des questions	Nombre des PME	%
	En accord	22	69
		Total	100 %
Capable de détecter instantanément l'écart fonctionnel du modèle existant avec le système physique réel	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	13	41
	En accord	19	59
		Total	100 %

La majorité des répondants (75 %) pensent que la FA aide à réduire les risques mécaniques des machines conventionnelles et les risques associés aux pièces mobiles et aux outils tels que l'écrasement, la coupe, le lancer, etc. La plupart des répondants (75 %) soulignent que la FA aide à réduire le risque de TMS en évitant les efforts excessifs et répétitifs.

Le Tableau 4.12 suivant présente les résultats reliés aux opportunités de la FA répertoriées sur la SST.

Tableau 4.12 Opportunités de fabrication additive sur la SST

Opportunités	Détails des questions	Nombre des PME	%
Aide à la réduction des phénomènes mécaniques dangereux des machines conventionnelles et des phénomènes dangereux associés aux pièces et outils en mouvement tels que l'écrasement, la coupe, la projection, etc.	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	8	25
	En accord	24	75
		Total	100 %
Aide à la réduction des risques de troubles musculosquelettiques (TMS) en évitant les efforts excessifs et répétitifs	En désaccord	0	0
	Ni en accord ni en désaccord	8	25
	En accord	24	75
		Total	100 %

4.6 Résultats relatifs aux menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST

La famille des menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST dans le questionnaire regroupe huit questions principales reliées à chacune des technologies de l'Industrie 4.0 (Annexe 2, section 6).

Seulement 42 % des répondants déclarent que les mégadonnées et l'infonuagique causent des problèmes psychologiques tels que le stress, la surcharge mentale et l'épuisement professionnel. Près de 58 % des répondants affirment que les mégadonnées et l'infonuagique peuvent causer des blessures en raison d'erreurs de données ou d'erreurs humaines ou de sécurité informatique. Environ, la moitié des répondants (55 %) accordent que l'absence de normes ou de réglementations appropriées concernant les mégadonnées et l'infonuagique peut entraîner des problèmes de SST.

Le Tableau 4.13 suivant présente les résultats reliés aux menaces de mégadonnées et de l'infonuagique répertoriées sur la SST.

Tableau 4.13 Menaces des mégadonnées et de l'infonuagique sur la SST

Menaces	Détails des questions	Nombre des PME	%
Problèmes psychologiques comme le stress, la surcharge mentale et l'épuisement professionnel	En désaccord	7	23
	Ni en accord ni en désaccord	11	35
	En accord	13	42
		Total	100 %
Blessures à cause des erreurs de données ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique	En désaccord	3	10
	Ni en accord ni en désaccord	10	32
	En accord	18	58
		Total	100 %
Problèmes de SST dus à l'absence de normes ou de règlements adaptés	En désaccord	3	10
	Ni en accord ni en désaccord	11	35
	En accord	17	55
		Total	100 %

Parmi les répondants interrogés, seuls 48 % affirment que l'IA cause des problèmes psychologiques tels que le stress, la surcharge mentale et l'épuisement professionnel. Plus de 68 % des répondants conviennent que l'IA peut causer des dommages en raison d'erreurs de données, d'erreurs humaines ou de sécurité informatique. Environ 52 % des répondants signalent que l'IA cause des problèmes de SST en raison d'un manque de normes ou de réglementations appropriées.

Le Tableau 4.14 suivant présente les résultats reliés aux menaces d'IA répertoriées sur la SST.

Tableau 4.14 Menaces de l'intelligence artificielle sur la SST

Menaces	Détails des questions	Nombre des PME	%
Problèmes psychologiques comme le stress, la surcharge mentale et l'épuisement professionnel	En désaccord	4	13
	Ni en accord ni en désaccord	12	39
	En accord	15	48
		Total	100 %
Blessures à cause des erreurs de données ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique	En désaccord	2	6
	Ni en accord ni en désaccord	8	26
	En accord	21	68
		Total	100 %
Problèmes de SST dus à l'absence de normes ou de règlements adaptés	En désaccord	3	10
	Ni en accord ni en désaccord	12	39
	En accord	16	52
		Total	100 %

La plupart des répondants (71 %) confirment que la robotique collaborative peut entraîner des blessures en raison de mouvements imprévisibles ou d'erreurs de données ou d'erreurs humaines ou de sécurité informatique. Près de 61% des répondants soulignent que la robotique collaborative peut causer des blessures dues à des pannes mécaniques. Plus de la moitié des répondants (65 %) rapportent que les sources d'énergie pneumatiques dans la robotique collaborative peuvent entraîner des blessures. La majorité des répondants (71 %) déclarent que les sources d'énergie hydraulique dans la robotique collaborative

peuvent entraîner des blessures. 61 % des répondants confirment que la robotique collaborative peut provoquer des TMS. Près de 65 % des répondants affirment que la robotique collaborative cause des problèmes psychologiques tels que le stress, la surcharge mentale, l'épuisement professionnel et l'anxiété. Seulement 58 % des répondants conviennent que l'absence de normes ou de réglementations compatibles avec la robotique collaborative peut entraîner des blessures.

Le Tableau 4.15 suivant présente les résultats liés aux menaces de la robotique collaborative répertoriées sur la SST.

Tableau 4.15 Menaces de la robotique collaborative sur la SST

Menaces	Détails des questions	Nombre des PME	%
Blessures dues à des mouvements imprévisibles ou des erreurs de données ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique	En désaccord	3	10
	Ni en accord ni en désaccord	6	19
	En accord	22	71
		Total	100 %
Blessures dues à des pannes mécaniques	En désaccord	2	6
	Ni en accord ni en désaccord	10	32
	En accord	19	61
		Total	100 %
Blessures causées par des sources d'énergie pneumatique	En désaccord	2	6
	Ni en accord ni en désaccord	9	29
	En accord	20	65
		Total	100 %
Blessures causées par des sources d'énergie hydraulique	En désaccord	1	3
	Ni en accord ni en désaccord	8	26
	En accord	22	71
		Total	100 %
Électrification ou décharges électriques	En désaccord	3	10
	Ni en accord ni en désaccord	11	35
	En accord	17	55
		Total	100 %

Tableau 4.15 Menaces de la robotique collaborative sur la SST (suite)

Menaces	Détails des questions	Nombre des PME	%
Troubles musculosquelettiques	En désaccord	3	10
	Ni en accord ni en désaccord	9	29
	En accord	19	61
		Total	100 %
Problèmes psychologiques comme le stress, la surcharge mentale, l'épuisement professionnel et l'anxiété	En désaccord	3	10
	Ni en accord ni en désaccord	8	26
	En accord	20	65
		Total	100 %
Blessures dues à l'absence de normes ou de règlements adaptés	En désaccord	2	6
	Ni en accord ni en désaccord	11	35
	En accord	18	58
		Total	100 %

La majorité des répondants (68 %) affirment que les erreurs de données, les lacunes d'intégration, les erreurs humaines ou la sécurité informatique entraînent des blessures lors de la simulation. Seuls 55 % des répondants conviennent que l'absence de normes ou de réglementations appropriées liées à la simulation cause des blessures.

Le Tableau 4.16 suivant présente les résultats reliés aux menaces de la simulation en lien avec la SST.

Tableau 4.16 Menaces de la simulation sur la SST

Menaces	Détails des questions	Nombre des PME	%
Blessures dues à des erreurs de données ou des écarts d'intégration ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique	En désaccord	4	13
	Ni en accord ni en désaccord	6	19
	En accord	21	68
		Total	100 %
Blessures dues à l'absence de normes ou de règlements adaptés	En désaccord	5	16
	Ni en accord ni en désaccord	9	29
	En accord	17	55
		Total	100 %

Plus de la moitié des répondants (61 %) conviennent que l'IoT, l'IoS et les CPS peuvent entraîner des dommages physiques en raison d'erreurs de données, de lacunes d'intégration, d'erreurs humaines ou de sécurité informatique. Seulement 48 % des PME affirment que l'IoT, l'IoS et les CPS causent des problèmes psychologiques comme le stress, la surcharge mentale, l'épuisement professionnel et l'anxiété. Près de 55 % des PME accordent que l'absence de normes ou de règlements adaptés liée à l'IoT, à l'IoS et aux CPS cause des blessures.

Le Tableau 4.17 suivant présente les résultats reliés aux menaces de IoT, IoS et des CPS répertoriées sur la SST.

Tableau 4.17 Menaces d'Internet des objets ou des services et des systèmes cyberphysiques sur la SST

Menaces	Détails des questions	Nombre des PME	%
Blessures physiques dues à des erreurs de données ou des écarts d'intégration ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique	En désaccord	3	10
	Ni en accord ni en désaccord	9	29
	En accord	19	61
		Total	100 %
Problèmes psychologiques comme le stress, la surcharge mentale, l'épuisement professionnel et l'anxiété	En désaccord	4	13
	Ni en accord ni en désaccord	12	39
	En accord	15	48
		Total	100 %
Blessures dues à l'absence de normes ou de règlements adaptés	En désaccord	3	10
	Ni en accord ni en désaccord	11	35
	En accord	17	55
		Total	100 %

Plus de la moitié des répondants (65 %) rapportent que la RA provoque des blessures dues à des erreurs de données, des erreurs humaines, la sécurité informatique, limitations visuelles et de perception, étourdissement ou fatigue, etc. Seuls 55 % des répondants conviennent que l'absence de normes ou de réglementations appropriées en matière de la RA cause des dommages.

Le Tableau 4.18 suivant présente les résultats reliés aux menaces de la RA répertoriées sur la SST.

Tableau 4.18 Menaces de la réalité augmentée sur la SST

Menaces	Détails des questions	Nombre des PME	%
Blessures dues à des erreurs de données ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique, limitations visuelles et de perception, étourdissement, fatigue, etc.	En désaccord	2	6
	Ni en accord ni en désaccord	9	29
	En accord	20	65
		Total	100 %
Blessures dues à l'absence de normes ou de règlements adaptés	En désaccord	2	6
	Ni en accord ni en désaccord	12	39
	En accord	17	55
		Total	100 %

Pour la réalité augmentée, l'une des PME a annoncé ce qui suit comme des menaces pour la SST :

- Le rayonnement de l'écran, en particulier la lumière bleue;
- Les incohérences sensorielles que la réalité virtuelle crée sur le cerveau.

Près de 58 % des répondants affirment que les jumeaux numériques causent des dommages en raison d'erreurs de données, de lacunes d'intégration, d'erreurs humaines ou de sécurité informatique. Environ 45 % des répondants conviennent que l'absence de normes ou de réglementations compatibles avec les jumeaux numériques entraîne des blessures.

Le Tableau 4.19 suivant présente les résultats reliés aux menaces des jumeaux numériques répertoriées sur la SST.

Tableau 4.19 Menaces des jumeaux numériques sur la SST

Menaces	Détails des questions	Nombre des PME	%
Blessures dues à des erreurs de données ou des écarts d'intégration ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique	En désaccord	1	3
	Ni en accord ni en désaccord	12	39
	En accord	18	58
		Total	100 %
Blessures dues à l'absence de normes ou de règlements adaptés	En désaccord	3	10
	Ni en accord ni en désaccord	14	45
	En accord	14	45
		Total	100 %

58 % des répondants conviennent que la FA cause des dommages en raison d'erreurs de données, d'écart d'intégration, d'erreurs humaines, de sécurité informatique, d'incendie ou de brûlure, etc. Seulement 58 % des répondants confirment que la FA provoque des maladies professionnelles telles que des problèmes respiratoires ou cutanés. Environ la moitié des répondants (52 %) déclarent que l'absence de normes ou de réglementations conformes à la FA cause des dommages.

Le Tableau 4.20 ci-dessous présente les résultats reliés aux menaces de la FA répertoriées sur la SST.

Tableau 4.20 Menaces de la fabrication additive sur la SST

Menaces	Détails des questions	Nombre des PME	%
Blessures dues à des erreurs de données ou des écarts d'intégration ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique, incendies, brûlures, etc.	En désaccord	2	6
	Ni en accord ni en désaccord	11	35
	En accord	18	58
		Total	100 %
Maladies professionnelles comme les problèmes respiratoires ou cutanés	En désaccord	1	3
	Ni en accord ni en désaccord	12	39
	En accord	18	58
		Total	100 %
Blessures dues à l'absence de normes ou de règlements adaptés	En désaccord	2	6
	Ni en accord ni en désaccord	13	42
	En accord	16	52
		Total	100 %

4.7 Discussions des résultats

Il convient de noter que toute la discussion des résultats dans cette section est réalisée en se référant au portrait initial des opportunités et des menaces des technologies de l'Industrie 4.0 en SST synthétisé dans la revue de la littérature (chapitre 1, section 1.3.3). La première partie de la discussion traite des opportunités offertes par les technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST et la deuxième partie expose les menaces de ces mêmes technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST, selon les résultats obtenus des PME consultées et confrontés aux constats de différents auteurs.

4.7.1 Les opportunités des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST

a) Mégadonnées et infonuagique

La majorité des répondants (72 %) confirment que les mégadonnées et l'infonuagique conduiront à des décisions plus précises en temps réel, et 75 % de ces répondants

confirment l'impact positif de ces deux technologies sur les performances. Badri et al. (2018) et Vogel et al. (2016) ont soutenu les mêmes affirmations.

Presque la moitié des répondants (56 %) affirment que la sécurité et la stabilité des systèmes industriels seront améliorées grâce à l'utilisation des mégadonnées et de l'infonuagique. Bien que Vogl et al. (2016) soutiennent cette affirmation, certains auteurs, notamment Zhaohao et al. (2018) et Bin Arfa Rabai et al. (2013) estiment que ces deux technologies vont créer de nombreux défis et risques en termes de fiabilité et de sécurité. Les mêmes répondants s'accordent à confirmer que les mégadonnées et l'infonuagique sont capables d'analyser le comportement des individus et aider à identifier les comportements à risque. Les conclusions de Badri et al. (2018) soutiennent cette affirmation.

66 % des répondants confirment que les mégadonnées et l'infonuagique ont la capacité à prédire des erreurs système avant qu'elles ne surviennent. Cette confirmation est appuyée par Badri et al. (2018), qui ont souligné cette capacité pour ces technologies. 56 % des répondants confirment le rôle important des logiciels basés sur les mégadonnées et l'infonuagique dans la gestion des risques professionnels des systèmes, comme le soulignent Cioca et Ivascu (2014) dans leur travail de recherche.

b) Intelligence artificielle

La grande majorité des répondants (84 %) affirment que l'IA améliore l'efficacité des programmes de formation en prévoyant des situations dangereuses. Cette opportunité est également soulignée par Howard (2019).

81 % des répondants conviennent que les applications de l'IA peuvent servir à prendre des décisions en temps réel sur des problèmes complexes. Cette affirmation est appuyée par plusieurs auteurs (Abioye et al., 2021; Ribeiro et al., 2021; Howard, 2019).

66 % des répondants affirment que l'IA aide à identifier rapidement les dangers. Cette confirmation est étayée par Abioye et al. (2021) et par Badri et al. (2018), qui pour eux

l'IA permet d'identifier les situations dangereuses et de réduire les risques en SST. Parmi les répondants, 69 % conviennent que l'IA est capable de bien évaluer des risques. Ceci est appuyé par EU-OSHA (2021) qui a souligné le rôle de l'IA dans cette discipline. EU-OSHA (2021) mentionne le rôle promoteur de l'IA à identifier les risques psychosociaux en temps réel. En plus, la majorité des répondants (72 %) ont déclaré que l'IA aide à détecter les anomalies d'un réseau afin de réduire l'impact des cyberattaques comme souligné par Elahyani et al. (2021).

c) Robotique collaborative (Cobotique)

La grande majorité des répondants (81 %) confirment que la robotique collaborative permet d'éliminer les tâches répétitives, ardues et dangereuses et créer un environnement ergonomique, comme ce fut le cas de certains auteurs (Neumann et al., 2021; Knudsen et Kaivo-oja, 2020).

66 % des répondants confirment que la robotique collaborative est capable d'interagir de manière plus flexible et indépendante que ce soit avec les humains ou les autres cobots. De nombreux auteurs ont déjà confirmé ce constat et ont également affirmé qu'elle améliore la flexibilité et l'accessibilité au travail (Neumann et al., 2021; Knudsen et Kaivo-oja, 2020; Badri et al., 2018).

d) Simulation

La majorité des répondants (72 %) notent que grâce à la simulation, la probabilité et la gravité des risques liés aux machines et aux travailleurs peuvent être estimées, selon différents scénarios et les risques peuvent ainsi être évités, comme soutenus par Hu et al. (2021) et Badri et al. (2018). Le même pourcentage de répondants confirme que la simulation permet de minimiser les risques liés à la production, le stress au travail et les pertes de temps en prévoyant les effets des changements dans les processus de production. Ceci est soutenu par la recherche de Badri et al. (2018). Cette même recherche soutient l'affirmation de 66 % des répondants, qui estiment que la simulation de plusieurs

scénarios de production conduit à des environnements plus ergonomiques, plus sécuritaires et plus confortables pour les travailleurs.

e) Internet des objets ou des services et systèmes cyberphysiques

Les travaux de Gisbert et al. (2014) exposent que l'IoT, l'IoS et les CPS sont capables de détecter les dangers avant qu'ils ne surviennent, et 50 % des répondants confirment cette opportunité offerte par ces technologies. 66 % des répondants confirment l'impact de l'IoT, l'IoS et les CPS sur le contrôle et l'amélioration de la performance des ÉPC et des ÉPI. Cette affirmation est soutenue par plusieurs auteurs (Bavaresco et al., 2021; Liu et al., 2020b; Podgórski et al., 2017).

Le même nombre de répondants admettent que l'IoT, l'IoS et les CPS aident à détecter les erreurs grâce à une communication en temps réel entre les machines. Les résultats de recherche de Badri et al. (2018) soutiennent cette idée. Parmi les répondants, 59 % affirment que l'IoT, l'IoS et les CPS réduisent les effets physiologiques du travail répétitif et lourd. Bavaresco et al. (2021) et PEROSH (2012) ont soutenu ce constat en affirmant que ces technologies peuvent atténuer les effets négatifs des tâches répétitives en mesurant des paramètres physiologiques.

Et enfin, 66 % des répondants estiment que l'IoT, l'IOS et les CPS sont capables de collecter, de stocker et d'évaluer de grandes quantités de données en temps réel. Bavariasco et al. (2021) et PEROSH (2012) ont démontré cette capacité à collecter des métadonnées et à évaluer les données de SST en temps réel.

f) Réalité augmentée

69 % des répondants affirment que la RA permet la collecte de données en temps réel sur le lieu de travail. Cette confirmation est soutenue par Naylor (2019) et Kadir et al. (2019) qui mentionne une idée similaire. 59 % des répondants approuvent le rôle de la RA dans l'identification des zones dangereuses, les scénarios à risque et l'évaluation des risques en temps réel. Naylor (2019) et Ninness (2018) soulignent également l'importance du rôle de la RA dans ces contextes à l'aide d'algorithmes basés sur des données.

Selon 66 % des répondants, la RA améliore la performance des ÉPI et leur permet de collecter des informations environnementales en temps réel. Cette affirmation est appuyée par certains auteurs qui évoquent ces capacités de la RA permettant de réduire les risques de SST (Liu et al., 2020b; Naylor, 2019).

La majorité des répondants (78 %) conviennent que la RA améliore les programmes de formation qui aident à prévenir les risques. Cette confirmation est soutenue par les recherches de plusieurs auteurs qui reconnaissent l'importance de la RA dans la formation des travailleurs (Bavaresco et al., 2021; kim et al., 2019). Parmi les répondants, 75 % estiment que la RA peut fournir les instructions nécessaires pour améliorer la précision des tâches de maintenance permettant ainsi de réduire les erreurs. Cette confirmation est soutenue par Naylor (2019).

g) Jumeaux numériques

63 % des répondants confirment que les jumeaux numériques mettent à jour simultanément les mouvements des personnes et des équipements pour éviter les erreurs. Liu et al. (2020a) ont soutenu ce constat en affirmant que les jumeaux numériques aident à mieux comprendre les interactions homme-machine lors de tout besoin de changement dans l'environnement d'assemblage ou de production.

Selon 69 % des répondants, les jumeaux numériques sont capables d'analyser l'ergonomie au travail et de mieux attribuer les tâches. Linli et al. (2019) ont souligné le même constat dans leurs travaux de recherche.

La capacité des jumeaux numériques à imiter des environnements à risque pour mieux identifier les risques de l'environnement réel a été confirmée par 69 % des répondants, comme soutenu par Liu et al. (2020a). Les mêmes répondants déclarent qu'avec l'aide des jumeaux numériques, les opérateurs peuvent être formés sur une machine virtuelle sans risque pour eux-mêmes ou pour la machine. Cette manière d'éviter les risques grâce à la formation virtuelle des travailleurs utilisant des jumeaux numériques a été soulignée par Rodic (2017).

Plus de la moitié des répondants (59 %) ont déclaré que les jumeaux numériques sont capables de détecter instantanément les différences fonctionnelles entre le modèle existant et le système physique réel. Cette affirmation est confirmée par certains auteurs qui ont souligné que l'utilisation des jumeaux numériques représentant avec précision le système physique peut repérer les écarts par la réalité (Liu et al., 2020a; Goossens, 2017).

h) Fabrication additive

La majorité des répondants (75 %) affirment que la FA aide à réduire les risques mécaniques des machines conventionnelles et les risques associés aux pièces et outils mobiles. Paolini et al. (2019) soutiennent ceci et indiquent que la FA améliore la sécurité au travail en augmentant le degré d'automatisation et en simplifiant le processus de production. La confirmation des mêmes répondants sur le rôle de la FA dans la réduction de la charge physique et du risque de TMS en évitant les activités excessives et répétitives a été appuyée par les recherches de Paolini et al. (2019).

4.7.2 Les menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST

a) Mégadonnées et infonuagique

Seulement 42 % des répondants affirment que ces technologies provoquent des troubles psychologiques tels que du stress, une surcharge mentale ou encore un épuisement professionnel. 58 % des répondants estiment que les erreurs de données, les erreurs humaines ou de sécurité informatique causées par les mégadonnées et l'infonuagique entraînent des blessures physiques. Cette confirmation est soutenue par plusieurs auteurs qui les considèrent comme sources de problèmes physiques, de sécurité et de troubles psychologiques (Turk et al., 2021; Agrafiotis et al., 2018; Badri et al., 2018; Cole et al., 2015). Presque la moitié des répondants (55 %) confirment que l'absence de normes ou de réglementations appropriées concernant les mégadonnées et l'infonuagique cause des problèmes de SST, comme l'ont démontré Badri et al. (2018) dans leurs recherches.

b) Intelligence artificielle

De nombreux auteurs soulignent les risques psychologiques associés à l'utilisation de l'IA à cause d'une surveillance excessive du comportement et des performances des travailleurs (EU-OSHA, 2021; Vaio et al., 2021; Howard, 2019; Moore, 2019). Cependant, seuls 48 % des répondants conviennent que l'IA entraîne des problèmes psychologiques, ainsi que de la frustration, du stress et de l'anxiété. 68 % affirment que les données de mauvaise qualité, les modèles imprécis de l'IA et les cyberattaques peuvent entraîner des blessures physiques. Cette confirmation est appuyée par plusieurs auteurs (Galaz et al., 2021; Sunarti et al., 2021; Bousdekis et al., 2020; Moore, 2019; Badri et al., 2018; Lee et al., 2018).

Moore (2019) et Badri et al. (2018) manifestent que les lois pour l'intégration de la technologie avancée de l'IA sur le lieu de travail doivent être révisées pour prévenir les risques de SST. En effet, la moitié des répondants (52 %) confirment que le manque de normes ou l'absence de mises à jour de la réglementation concernant l'utilisation de l'IA entraînent évidemment des risques pour la SST.

c) Robotique collaborative (Cobotique)

La majorité des répondants (71 %) confirment que des mouvements imprévisibles, des erreurs de données, des erreurs humaines ou la sécurité informatique de la robotique collaborative peuvent causer des blessures physiques. Cette affirmation est soutenue par plusieurs auteurs (Badri et al, 2018; IRSST, 2017; Cui et al, 2014).

Les blessures provoquées par des pannes mécaniques ont été confirmées par 61 % des répondants, celles causées par des sources d'énergie pneumatiques ont été confirmées par 65 % des répondants et les blessures causées par des sources d'énergie hydraulique ont été constatées par 71 % des répondants. La recherche de Cui et al, (2014) qui a répertorié les risques liés à la présence de la robotique collaborative sur le lieu de travail en raison

de pannes mécaniques, de sources d'énergie pneumatique et de sources d'énergie hydraulique vient appuyer les conclusions.

Presque la moitié des répondants (55 %) confirment des blessures causées par électrocution ou chocs électriques dus à la robotique collaborative. Cui et al. (2014) ont également discuté dans leurs recherches de ces menaces, en matière de SST. 61 % des répondants notent que la robotique collaborative peut engendrer des risques de TMS des travailleurs à proximité. Cette confirmation est appuyée par l'IRSST (2017) qui affirme que la robotique collaborative peut causer des TMS à long terme.

Un effet négatif sur la santé mentale des travailleurs et des problèmes psychologiques comme le stress, la surcharge mentale, l'épuisement professionnel et l'anxiété liée à la robotique collaborative ont été exprimés par 65 % des répondants, ce qui est soutenu par de nombreux auteurs (Neumann et al., 2021; Adem et al., 2020; Haight, 2020; Nekhoda et Kuklina, 2020; Rampersad, 2020; Brocal et al., 2019; Badri et al., 2018; IRSST, 2017).

Un peu plus de 58 % des répondants conviennent que l'absence de normes ou de réglementations appropriées pour la sécurité des cobots peut entraîner des problèmes de SST. Badri et al. (2018) et IRSST (2017) appuient ce constat puisqu'ils ont considéré le manque de normes bien adaptées concernant les nouvelles technologies de l'Industrie 4.0, telles que les robotiques collaboratives.

d) Simulation

68 % des répondants confirment que des erreurs de données ou dans des modèles de simulation, des erreurs humaines ou de sécurité informatique lors de l'utilisation de la simulation peuvent entraîner des problèmes en SST. Cette confirmation est appuyée par Badri et al. (2018). Selon la même recherche, le fait de ne pas mettre à jour les lois et réglementations liées aux technologies de l'Industrie 4.0, y compris la simulation, peut provoquer des problèmes de SST. 55 % des répondants confirment également les conclusions de Badri et al. (2018).

e) Internet des objets ou des services et systèmes cyberphysiques

61 % des répondants notent que les cyberattaques, les erreurs de données, les infrastructures non fiables, ainsi que les mauvaises décisions ou lacunes d'intégration liées à l'IoT, à l'IoS et aux CPS peuvent entraîner des dommages physiques. Cette affirmation est appuyée par plusieurs auteurs qui les considèrent comme des sources de blessures physiques pour les travailleurs (Corallo et al., 2020; Moore et al., 2020; Elhabashy et al., 2019; Agrafiotis et al., 2018).

Seulement 48 % des répondants mentionnent que l'IoT ou l'IoS et les CPS peuvent s'avérer la raison de plusieurs pathologies psychologiques comme le stress, l'épuisement professionnel, la dépression ou les troubles anxieux. Cependant, plusieurs auteurs ont mis en évidence les dommages psychologiques causés par ces technologies (Neumann et al., 2021; Agrafiotis et al., 2018; Ben-Ner et Urtasun, 2013).

Presque la moitié des répondants (55 %) conviennent que l'absence de normes ou de réglementations appropriées liées à l'IoT, à l'IoS et aux CPS entraîne des problèmes de SST. Badri et al. (2018) considèrent le manque de normes, en lien avec les technologies de l'Industrie 4.0, comme une menace pour la SST.

f) Réalité augmentée

La plupart des répondants (65 %) affirment que les erreurs de données, les erreurs humaines, les limitations visuelles et perceptuelles, les problèmes physiques (étourdissements, fatigue, etc.) et les cyberattaques causés par l'utilisation de la RA peuvent entraîner des blessures physiques. Il convient de noter que plusieurs auteurs soutiennent cette affirmation (Fox et al., 2020; Dissanayak, 2018; Lee et al., 2018; Gupta, 2017). Les blessures causées par l'absence de normes ou de réglementations en réponse à la technologie RA ont été confirmées par 55 % des répondants et ont également été soulevées dans les travaux de Badri et al. (2018).

g) Jumeaux numériques

Les dommages liés aux jumeaux numériques causés par des erreurs de données, des écarts d'intégration, des erreurs humaines ou les problèmes de cybersécurité ont été soulignés par 58 % des répondants. En outre, Hearn et Rix (2019) appuient cette confirmation dans leurs recherches. Badri et al. (2018) ont souligné le risque de SST causé par le manque de normes appropriées et des règles claires pour assurer la bonne intégration d'une nouvelle technologie comme les jumeaux numériques dans un processus industriel. 45 % des répondants affirment que l'absence de réglementations adaptées aux jumeaux numériques présente une menace pour la SST.

h) Fabrication additive

58 % des répondants confirment que la FA peut entraîner des dommages physiques dus à des erreurs de données, des erreurs humaines, des cyberattaques ou des incendies et brûlures, etc. Cette affirmation est soutenue par de nombreux auteurs (Bates et Robertson, 2020; Moreno-Cabezali et Fernandez-Crehuet, 2020; Buranska et Buransky, 2019).

Les mêmes répondants conviennent que la FA peut provoquer des maladies professionnelles, notamment en lien avec des problèmes respiratoires ou cutanés. Ceci confirme les problèmes de SST dus à la nature toxique et dangereuse des matières premières utilisées en FA comme l'affirment plusieurs auteurs (Bates et Robertson 2020; Nagarajan et al., 2020; Buranska et Buransky, 2019; Rejeski et al., 2018; Zhang et al., 2018). La moitié des répondants (52 %) confirment que l'absence de normes ou de réglementations appropriées en réponse aux développements technologiques liés à la FA peut entraîner des blessures et des problèmes de SST, comme le soulignent Badri et al. (2018) dans leurs travaux. Le Tableau 4.21 récapitule les principales opportunités et menaces identifiées dans la recherche.

Tableau 4.21 Les principales opportunités et menaces identifiées dans la recherche

Groupe technologique de l'Industrie 4.0	Opportunité potentielle en SST	Menaces potentielles en SST
Mégadonnées et infonuagique	<ul style="list-style-type: none"> - Aide à prendre des décisions en temps réel - Capacité à prédire des erreurs système avant qu'elles ne surviennent - Performance améliorée 	<ul style="list-style-type: none"> - Absence de normes ou de règlements adaptés en SST - Accidents de travail (Blessures dues à des erreurs de données ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique)
Intelligence artificielle	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de l'efficacité des programmes de formation - Décision en temps réel - Reconnaissance rapide des dangers - Évaluation avancée des risques - Détection d'anomalies du réseau afin de réduire l'impact des cyberattaques 	<ul style="list-style-type: none"> - Accidents de travail (Blessures dues à des données ou des modèles non fiables ou à la sécurité informatique) - Absence de normes ou de règlements adaptés en SST
Robotique collaborative (Cobotique)	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des tâches répétitives, ardues et dangereuses - Interaction de manière plus flexible et indépendante avec les travailleurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Accidents de travail (Blessures dues à des erreurs de données ou des mouvements imprévisibles ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique, écrasement, pression, chocs, etc.) - Blessures dues à des pannes mécaniques - Blessures causées par des sources d'énergie pneumatique - Blessures causées par des sources d'énergie hydraulique - Création des TMS - Problèmes psychologiques comme le stress, la surcharge mentale, l'épuisement professionnel et l'anxiété - Absence de normes ou de règlements adaptés en SST

Tableau 4. 22 Les principales opportunités et menaces identifiées dans la recherche(suite)

Groupe technologique de l'Industrie 4.0	Opportunité potentielle en SST	Menaces potentielles en SST
Simulation	<ul style="list-style-type: none"> - Aide à prévention des risques par l'estimation la probabilité et la gravité des dangers liés aux machines et aux travailleurs dans différents contextes de travail - Réduction des risques liés à la production, le stress au travail et les pertes de temps - La simulation de plusieurs scénarios de production afin de mettre en place des processus plus ergonomiques, sécuritaires et pratiques 	<ul style="list-style-type: none"> - Accidents de travail (Blessures dues à des erreurs de données ou des écarts d'intégration ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique) - Absence de normes ou de règlements adaptés en SST
Internet des objets ou des services et systèmes cyberphysiques	<ul style="list-style-type: none"> - Aide à contrôler et à améliorer la performance des ÉPC et des ÉPI - Réduction des effets physiologiques du travail répétitif et lourd - Capacité de collecter, de stocker et d'évaluer de grandes quantités de données en temps réel 	<ul style="list-style-type: none"> - Blessures physiques dues à des erreurs de données ou des infrastructures non fiables ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique - Absence de normes ou de règlements adaptés en SST
Réalité augmentée	<ul style="list-style-type: none"> - Capacité à collecter les données en temps réel - Amélioration de la performance des ÉPI - Amélioration de l'efficacité des programmes de formation - Améliorer la précision lors de la maintenance afin de réduire les erreurs évitables - Identification des zones dangereuses, les scénarios à risque et l'évaluation des risques en temps réel 	<ul style="list-style-type: none"> - Blessures dues à des erreurs de données ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique, limitations visuelles et de perception, étourdissement, fatigue, etc. - Absence de normes ou de règlements adaptés en SST
Jumeaux numériques	<ul style="list-style-type: none"> - Capacité d'une analyse approfondie de l'ergonomie du travail - Capacité d'imitation des environnements à risque pour mieux identifier les risques de l'environnement réel 	<ul style="list-style-type: none"> - Blessures dues à des erreurs de données ou des écarts d'intégration ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique

	<ul style="list-style-type: none"> - Capacité de formation des travailleurs sur les machines sans risques - Capacité de mise à jour simultanée des mouvements des personnes et des équipements pour éviter les erreurs 	
Fabrication additive	<ul style="list-style-type: none"> - Aide à réduire les risques mécaniques des machines conventionnelles et les risques associés aux pièces et outils mobiles - Réduction des TMS 	<ul style="list-style-type: none"> - Blessures dues à des erreurs de données ou des écarts d'intégration ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique, incendies, brûlures, etc. - Maladies professionnelles comme les problèmes respiratoires ou cutanés

4.8 Limites et travaux futurs

Malgré l'effort soutenu à livrer un travail de recherche de grande qualité, les résultats présentent plusieurs limites.

Tout d'abord, le présent de travail s'est basé sur l'étude des opportunités et des menaces de chacune des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST réalisée dans des publications scientifiques très limitées en nombre. Cette limitation a posé une limite quant à la richesse du portrait initial, la base de la consultation des entreprises.

Ensuite, les entreprises sollicitées étaient dans certains cas peu familiarisées avec les concepts et les technologies de l'Industrie 4.0. Cette limitation a posé un défi quant à leur recrutement, ce qui a limité l'échantillon.

De plus, l'échantillon et la sélection des régions de répondants (Mauricie et Centre-du-Québec, Estrie, Montréal et Abitibi-Témiscamingue) ont limité la possibilité de généraliser avec certitude des résultats obtenus.

Enfin, l'analyse des résultats s'est faite sur la base de l'avis des répondants, avec une participation volontaire. Par conséquent, il n'y a aucune certitude quant à l'exactitude et à la véracité des résultats. Il est possible que les entreprises qui ont volontairement choisi de participer à l'étude n'aient pas suffisamment de connaissances et que leurs réponses ne soient pas une preuve d'exactitude et de justesse.

En ce qui concerne les travaux à l'avenir, les résultats de cette recherche peuvent servir de base pour un projet de grande envergure et axée sur la SST en contexte de l'Industrie 4.0. Ce travail servira, entre autres, de ressource pour mieux préciser les menaces de chacune des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST. Ceci aidera les entreprises manufacturières à mieux protéger les travailleurs exposés à de multiples risques dans des environnements de travail complexes et dynamiques. Cela conduira également à mieux sensibiliser les décideurs et les législateurs quant à la problématique

de SST des nouvelles technologies afin d'améliorer les textes juridiques et mieux développer des normes plus adaptées au contexte.

CONCLUSION

Le terme « Industrie 4.0 » s'est développé rapidement avec l'émergence des technologies numériques, dont l'intelligence artificielle, l'IoT, la robotique collaborative, etc. Il existe de nombreuses publications et études scientifiques dans ce domaine, mais peu d'entre elles ont évoqué le sujet de l'intégration de la SST dans la 4^e révolution industrielle. Il est évident qu'ignorer les risques de SST lors de la transition vers l'Industrie 4.0 peut entraîner des conséquences négatives sur la globalité des projets industriels. Par conséquent, il est crucial d'identifier les opportunités et les menaces des technologies de l'Industrie 4.0.

L'objectif de ce projet de recherche était d'identifier les opportunités et les menaces de chacune des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST en contexte de transformation numérique des PME manufacturières québécoises. La vérification de la littérature a permis de dresser un portrait initial de ces opportunités et menaces sur la SST. Afin d'élaborer un portrait pratique, une consultation des PME manufacturières québécoises a été réalisée pour préciser et améliorer le portrait initial basé sur une revue de la littérature.

Les résultats de recherche ont conclu que peu importe la technologie utilisée de l'Industrie 4.0, elle présente systématiquement des opportunités comme aussi des menaces pour la SST. Selon la même consultation, la majorité des PME impliquées ont souligné le manque de normes ou de réglementations appropriées et adaptées qui peuvent mieux encadrer la grande majorité des technologies afin de réduire leurs menaces quant à la SST.

Malgré les limites de ce travail de recherche, il a été possible d'élaborer un premier portrait pratique des opportunités et des menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST, grâce à la collaboration d'un échantillon de 32 PME manufacturières québécoises. Tenir compte de ce portrait élaboré pourra inciter les PME à mieux intégrer la SST dans le choix, l'intégration et l'utilisation des technologies durant leur transformation numérique.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Adem, A., Çakit, E., Dağdeviren, M. (2020). Occupational health and safety risk assessment in the domain of Industry 4.0. *Journal of Springer Nature Switzerland AG*, 2 (5).
- Agence européenne pour la santé et la sécurité au travail (EU-OSHA). (2015). *Perspectives sur le travail de demain : la robotique, Bilbao*.
- Agrafiotis, I., Nurse, J. R. C., Goldsmith, M., Creese, S., Upton, D. (2018). A taxonomy of cyber-harms: Defining the impacts of cyber-attacks and understanding how they propagate, *Journal of Cybersecurity*, 4 (1), 1–15.
- Alama, M.F., Katsikas, S., Beltramello, O., Hadjiefthymiades, S. (2017). Augmented and virtual reality based monitoring and safety system: A prototype IoT platform. *Journal of Network and Computer Applications*, 89, 109-119.
- Alcácer, V., Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 22, 899–919.
- Alhayani, B., Jasim Mohammed, H., Zeghaiton Chaloob, I., Saleh Ahmed, J. (2021). Effectiveness of artificial intelligence techniques against cyber security, risks apply of IT industry. *Journal of Materials Today: Proceedings*.
- Alliance for Manufacturing Foresight (MForesight)., Computing Community Consortium (CCC). (2017). *Cybersecurity for manufacturers: Securing the Digitized and Connected Factory*. Computing Community Consortium. Consulté le septembre 2017, tiré de <https://cra.org/ccc/events/cyber-physical-security-manufacturers-workshop/#overview>.
- Alteren, B. (1999). Implementation and evaluation of the Safety Element Method at four mining sites. *Journal of Safety Science*, 31 (3), 231-264.
- Amaral, A., Jorge, D., Peças, P. (2019). Small Medium Enterprises and Industry 4.0: Current Models Ineptitude and the Proposal of a Methodology to Successfully

- Implement Industry 4.0 in Small Medium Enterprises. *Journal of Procedia Manufacturing*, 41, 1103-1110.
- Aoun, A., Ilinca, A., Ghandour, M., Ibrahim, H. (2021). A review of Industry 4.0 characteristics and challenges, with potential improvements using blockchain technology. *Journal of Computers & Industrial Engineering*, 162, 107746.
- Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur affaires sociales (ASSTSAS). (2018). *Guide de Prévention, Indicateur en prévention SST*.
- Assante, D., Castro, M., Hamburg, I., Martin, S. (2016). The Use of Cloud Computing in SMEs. *Journal of Procedia Computer Science*, 83, 1207–1212.
- Aucourt, B. (2019). *L'Industrie 4.0 et la sécurité des machines*, Intervention prévention. Consulté le 4 July 2019, tiré de http://www.interventionprevention.com/industrie4-0_securite-machines/.
- Azadeh, A., Hasani Farmand, A., Jiryaei Sharahi, Z. (2012). Performance assessment and optimization of HSE management systems with human error and ambiguity by an integrated fuzzy multivariate approach in a large conventional power plant manufacturer. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25, 594-603.
- Babiceanu, R.F., Seker, R. (2016). Big Data and virtualization for manufacturing cyberphysical systems: a survey on the current status and future outlook. *Journal of Computers in Industry*, 81, 128–137.
- Badri, A., Boudreau-Trudel, B., Saâdeddine Souissi, A. (2018). Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern?. *Journal of Safety Science*, 109, 403–411.
- Baril-Gingras, G., Montreuil, S., Fournier, P.S., Laflamme, A.M., Lamonde, F., Bourbonnais, Renée., Malenfant, R., Messing, K., Trudel, L., Dionne, C., Laroche, E., Bellemare, M., Brisson, C. (2010). *Organiser la prévention de manière systématique, dans tous les lieux de travail, la redynamiser et prendre en compte les changements du travail et de l'emploi* (Mémoire au Groupe de travail de la CSST sur la révision de la LSST, Université Laval, Laval, Québec), Canada. Consulté le février

- 2010, tiré de <https://www.fss.ulaval.ca/notre-faculte/repertoire-du-personnel/genevieve-baril-gingras>.
- Bates, D.P., Robertson, T. (2020). *Safety Considerations for Additive Manufacturing and 3-D Printing*. Consulté le 24 février 2020, tiré de <https://www.ul.com/news/safety-considerations-additive-manufacturing-and-3-d-printing>.
- Bavaresco, R., Arruda, H., Rocha, E., Barbosa, J., Li, G.P. (2021). Internet of Things and occupational well-being in industry 4.0: A systematic mapping study and taxonomy. *Journal of Computers & Industrial Engineering*, 161, 107670.
- Bayram, M., C. Üngan, M., Ardiç, K. (2016). The relationships between OHS prevention costs, safety performance, employee satisfaction and accident costs. *International journal of occupational safety and ergonomics*, Consulté l'octobre 2016, tiré de 308948056_International_Journal_of_Occupational_Safety_and_Ergonomics_The_relationships_between_OHS_prevention_costs_safety_performance_employee_satisfaction_and_accident_costs_The_relationships_between_OHS_pre- ISSN: 1080-3548 (Print) 2376-9130 (Online) Journal homepage.
- Banque de développement du Canada (BDC). (2017). *Ministère de l'Économie et de l'Innovation*. Québec. Tiré de <https://www.bdc.ca/fr/documents/annualreport/bdc-rapport-annuel-2017.pdf>.
- Beetz, M., Bartels, G., Albu-Schäffer, A., Balint-Benczédi, F., Belder, R., Beßler, D., Haddadin, S., Maldonado, A., Mansfeld, N., Wiedemeyer, T., Weitschat, R., Worch, J.H. (2015). Robotic Agents Capable of Natural and Safe Physical Interaction with Human Co-workers. *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Congress Center Hamburg, Consulté le septembre 2015, tiré de https://www.researchgate.net/publication/308848734_Robotic_Agents_Capable_of_Natural_and_Safe_Physical_Interaction_with_Human_Co-Workers.
- Bekkali, A.E., Essaïdi, M., Boulmalf, M., Majdoubi, D.E. (2021). Systematic Literature Review of Internet of Things (IoT) Security. *Journal of Advances in Dynamical Systems and Applications*, 16, 1671-1692.

- Belikovetsky, S., Yampolskiy, M., Toh, J., Gatlin, J., Elovici, Y. (2017). drowned–Cyberphysical attack with additive manufacturing. *the 11th USENIX Conference on Offensive Technologies*, Consulté l'août 2017, tiré de <https://www.usenix.org/conference/woot17/workshopprogram/presentation/belikovetsky>.
- Ben-Ner, A., Urtasun, A. (2013). Computerization and skill bifurcation: the role of task complexity in creating skill gains and losses. *Journal of Industrial and Labor Relations Review*, 66 (1), 225–267.
- Bélangier, L., Brouillard, J. (2017). *Guide de prévention – Plan d'action en SST*. Montréal : Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur affaires sociales (ASSTSAS). Consulté 1er trimestre 2017, tiré de <https://www.asstsas.qc.ca>.
- Bérubé, M. (2004). *Législation et intervenants en santé et en sécurité du travail*. Montréal : APSAM. Tiré de <https://www.apsam.com>.
- Ben Arfa Rabai, L., Jouini, M., Ben Aissa, A., Mili, A. (2013). A cybersecurity model in cloud computing environments. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 25, 63–75.
- Bhattacharya, B., Winer, E.H. (2019). Augmented reality via expert demonstration authoring (AREDA). *Journal of Computers in Industry*, 105, 61–79.
- Blanc, S., Chellal, M., Mear, L. (2018). The Impact of Top Management Commitment on Occupational Health and Safety: A Systematic Review. *Journal of Safety and Health at Work*, 9(1), 1-10.
- Bocciarelli, P., D'Ambrogio, A., Giglio, A., Paglia, E. (2017). A BPMP extension for modeling Cyber-Physical-Production-Systems in the context of Industry 4.0. *IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*. Consulté le mai 2017, tiré de https://www.researchgate.net/publication/318890247_A_BPMN_extension_for_modeling_Cyber-Physical-Production-Systems_in_the_context_of_Industry_40.

- Bourget, C., Normand, M., Huynh Quan Suu, D., Vachon, K. (2017). *Portrait des pratiques numériques des entreprises manufacturières de la région de la Capitale-Nationale*. Québec : CEFRIO. Tiré de https://diffusion.banq.qc.ca/pdfjs-1.6.210-dist_banq/web/pdf.php/1qsoBVTQMygs7VKBkxKtzw.pdf.
- Bousdekis, A., Apostolou, D., Mentzas, G. (2020). A human cyber physical system framework for operator 4.0 – artificial Intelligence symbiosis. *Journal of Manufacturing Letters*, 25, 10–15.
- Branco, T., Soares, F., Lopez, A. (2017). Innovation and Transformation of Service Business Models through Cloud Technology to Achieve Co-Creation Value within the Service Ecosystem, Key Issues for the Successful Adoption of Cloud Computing. *Journal of Procedia Computer Science*, 121, 115-122.
- Brender, N., Markov, I. (2013). Risk perception and risk management in cloud computing: Results from a case study of Swiss companies. *International Journal of Information Management*, 33, 726–733.
- Breslin, C., Kyle, N., Bigelow, P., Irvin, E., Morassaei, S., MacEachen, E., Mahood, Q., Couban, R., Shannon, H., Amick, B., (2010). Effectiveness of health and safety in small enterprises: a systematic review of quantitative evaluations of interventions. *Journal of Occupational Rehabilitation*, 20 (2), 163–179.
- Brocal, F., González, C., Komljenovic, D., P.F., Katina, Sebastián, Miguel A. (2019). Emerging Risk Management in Industry 4.0: An Approach to Improve Organizational and Human Performance in the Complex Systems. *Journal of Complexity*, 13.
- Bruneau, J. (2018). *Les indicateurs de gestion en santé et sécurité*. CONFORMiT. Tiré de <https://www.conformit.com/health-safety-key-performance-indicators/>.
- British Standard Institute (BSI). (2010). *Risk management- Risk assessment techniques (EN 31010:2010)*. Brussels: BSI Standard Publication. Consulté le 30 juin 2010, <https://www.parsetraining.com>.
- British Standard Institute (BSI). (2007). *Système de management de la santé et de la sécurité au travail — exigences (OHSAS 18001)*. Royaume-Uni : British Standard

- Institute. Tiré de <https://innoprev.com/fichiers-telecharger/BS-OHSAS-18001-2007.pdf>.
- Buranska, E., Buransky, I. (2019). *Environment and safety impacts of additive manufacturing: a review*, (ISSN 1338-0532). University of Technology: Faculty of Materials Science and Technology Slovak. Consulté le septembre 2019, tiré de https://www.researchgate.net/publication/335691451_Environment_and_Safety_Impacts_of_Additive_Manufacturing_A_Review.
- Bureau international du Travail (BIT). (2019). *La Sécurité et la santé au cœur de l'avenir du travail, Mettre à profit 100 ans d'expérience*. Tiré de https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---europe/---ro-geneva/---ilo-lisbon/documents/genericdocument/wcms_690068.pdf.
- Cadieux, J., Roy, M., Desmarais, L. (2006). A preliminary validation of a new measure of occupational health and safety. *Journal of Safety Research*, 37 (4), 413–419.
- Cagno, E., Micheli, G.J.L., Jacinto, C., Masi, D. (2013). An interpretive model of occupational safety performance for Small- and Medium-sized Enterprises. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44, 60-74.
- Cagno, E., Micheli, G.J.L., Perotti, S. (2011). Identification of OHS-related factors and interactions among those and OHS performance in SMEs. *Journal of Safety Science*, 49 (20), 216-225.
- Cambon, J., Guarnieri, F., Groeneweg, J., (2005). Towards a new tool for measuring safety management systems performance. *Journal of Computer Science*, 53–62.
- Canadian Centre for Occupational Health and Safety (CCOHS). (2020). *Hazard and Risk – General*. Canadian Centre for Occupational Health and Safety. Consulté le juillet 2020, tiré de https://www.ccohs.ca/oshanswers/hsprograms/hazard/hazard_risk.html.
- CEFRIO (2016). *Prendre part à la révolution manufacturée, Du rattrapage technologique à l'Industrie 4.0 chez les PME*. CEFRIO. Tiré de <https://espace2.etsmtl.ca/id/eprint/14578/>.

- Cheng, Y., Chen, K., Sun, H., Zhang, Y., Tao, F. (2018). Data and knowledge mining with big data towards smart production. *Journal of Industrial Information Integration*, 9, 1–13.
- Cioca, L.L., Ivascu, L. (2014). IT technology implications analysis on the occupational risk: cloud computing architecture. *Journal of Procedia Technology*, 16, 1548–1559.
- Claverie, B., Le Blanc, B., Fouillat, P. (2013). La cobotique. *Journal of communication and organisation*, 203-214.
- Cole, D., Nelson, J., McDaniel, B. (2015). Benefits and Risks of Big Data. *Association for Information Systems, AIS Electronic Library (AISeL)*. Tiré de <http://aisel.aisnet.org/sais2015/26>.
- Commission de la Santé et de la Sécurité du Travail (CSST). (2011). *La modernisation du régime de santé et sécurité du travail*. CNESST. Consulté le 14 juin 2017, tiré de http://www.cnesst.gouv.qc.ca/Publications/Documents/Modernisation_du_r%C3%A9gime_de_sant%C3%A9_et_s%C3%A9curit%C3%A9_du_tra.
- Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST). (2010). *Programme de prévention propre à un établissement*. CNESST. Consulté le 1 septembre 2010, tiré de <https://www.cnesst.gouv.qc.ca/fr/prevention-securite/organiser-prevention/regime-interimaire/groupes-prioritaires>.
- Corallo, A., Lazoi, M., Lezzi, M. (2020). Cybersecurity in the context of industry 4.0: A structured classification of critical assets and business impacts. *Journal of Computers in Industry*, 114, 103165.
- Cui, G., Zhang, D., A. Rosen, M. (2014). *Robotics Safety: An Engineering Teaching Module*. Canada : Minerva Canada. Consulté le mars 2014, tiré de <https://www.new.safetymanagementeducation.com>.
- Dagdeviren, M., Yuksel, I. (2008). Developing a fuzzy analytic hierarchy process (AHP) model for behavior-based safety management. *Information Sciences*, 178, 1717–1733.

- Danjou, C., Rivest, L., Pellerin, R. (2017a). *PME 2.0 Le passage au numérique, Industrie 4.0 : des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité*. Cefrio. Tiré de <http://www.cefrio.qc.ca>.
- Danjou, C., Rivest, L., Pellerin, R. (2017b). Douze positionnements stratégiques pour l'Industrie 4.0 : entre processus, produit et service, de la surveillance à l'autonomie. *12ème Congrès International de Génie Industriel Compiègne, France*. Consulté le 3-5 mai 2017, tiré de <https://www.espace2.etsmtl.ca>.
- Delatour, G., Laclémence, P., Calcei, D., Mazri, C. (2014). Safety performance indicators: A questioning diversity. *Journal of Chemical Engineering Transactions*, 36, 55–60.
- Deloitte (2014). *Industry 4.0.—Challenges and Solutions for the Digital Transformation and Use of Exponential Technologies*. Consulté le 8 novembre 2019, tiré de <http://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/manufacturing/ch-en-manufacturing-industry-4-0-24102014>.
- De Rico, J-F. (2014). *L'infonuagique, la protection des renseignements personnels et les droits d'accès des gouvernements*. (EYB2014REP1480). Québec. Consulté le février 2014, tiré de <https://www.lccjti.ca>.
- Dissanayake, Viraj. (2018). *A review of Cyber security risks in an Augmented reality world*. ResearchGate, University of Sri Lanka Institute of Information Technology: Faculty of Computing. Consulté l'octobre 2018, tiré de <https://www.researchgate.net/publication/339941469>.
- Eakin, J.M, Lamm, F. Limborg, H.J, Frick, k. (2000). International perspectives on the promotion of health and safety in small workplaces, Systematic occupational health and safety - perspectives on an international development. *Systematic OHS management*. Consulté l'octobre 2000, tiré de <https://www.researchgate.net/publication/285763178>.
- Eakin, J., MacEachen, E. (1998). Health and social relations of work: a study of health-related experiences of employees in small workplaces. *Journal of Sociol Health*, 20 (6), 896–914.

- European Commission (EC). (2018). *Communication on Artificial Intelligence for Europe*. Brussels. Consulté l'avril 2018, tiré de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2018%3A237%3AFIN>.
- Elhabashy, A.E., Wells, L.J., Camelio, J. (2019). Cyber-Physical Security Research Efforts in Manufacturing – A Literature Review. *Journal of Procedia Manufacturing*, 34, 921-931.
- Essakly, A., Wichmann, M., S.Spengler, T. (2019). A reference framework for the holistic evaluation of Industry 4.0 solutions for small-and medium-sized enterprises. *IFAC-PapersOnLine*, 52 (13), 427-432.
- European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA). (2021). *Impact of artificial intelligence on occupational safety and health*. European agency for safety and health at work. Consulté le janvier 2018, tiré de <https://osha.europa.eu/en/publications/impact-artificial-intelligence-occupational-safety-and-health>.
- Fan, J., Fang, L., Wu, J., Guo, Y., Dai, Q. (2019). From Brain Science to Artificial Intelligence. *Journal of Engineering*, 6(3), 248-252.
- Fera, M., Macchiaroli, R. (2010). Appraisal of a new risk assessment model for SME. *Journal of Safety Science*, 48, 1361–1368.
- Fernández, F.B, Pérez, M. (2015). Analysis and Modeling of New and Emerging Occupational Risks in the Context of Advanced Manufacturing Processes. *Journal of Procedia Engineering*, 100, 1150-1159.
- Foidl, H., Felderer, M. (2016). Research Challenges of Industry 4.0 for Quality Management. *Conference: ERP Future 2015 -Research*, University of Innsbruck, Consulté l'avril 2016, tiré de <https://www.researchgate.net/publication/300319076>.
- Fox, S., Kotelba, A., Marstio, I., Montonen, J. (2020). Aligning human psychomotor characteristics with robots, exoskeletons and augmented reality. *Journal of Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 63, 101922.
- Galaz, V., Centeno, M. A., Callahan, P. W., Causevic, A., Patterson, T., Brass, I., Baum, S., Farber, D., Fischer, J., Garcia, D., McPhearson, T., Jimenez, D., King, B., Larcey,

- P., Levy, K. (2021). Artificial intelligence, systemic risks, and sustainability. *Journal of Technology in Society*, 67.
- Gamache, S., Abdul-Nour, G., Baril, C. (2019). Development of a Digital Performance Assessment Model for Quebec Manufacturing SMEs. *Journal of Procedia Manufacturing*, 38, 1085-1094.
- Gamache, S., Abdul-Nour, G., Baril, C. (2017). Toward Industry 4.0: Studies and practices in Quebec SMEs. *CIE47- International Conference on Computers and Industrial Engineering, Lisbon*. Consulté le 11-13 octobre 2017.
- Ganzarain, J., Errasti, N. (2016). Three stage maturity model in SMEs toward industry 4.0. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 9 (5), 1119-1128.
- Gegic, M., (2008). An analysis model of dominant working risks significant for the development of management system in metal: refining industry. *Union of Engineers and Technicians of Serbia*, 8, 9-16.
- Gélinas, R., Halley, A., Jacob, R., Drolet, J. (1996). Les caractéristiques et les spécificités de la PME : favorables ou défavorables au juste-à-temps?. *Revue internationale P.M.E.*, 9 (2), 81–101.
- Ghahramani, A., Salminenb, S. (2019). Evaluating effectiveness of OHSAS 18001 on safety performance in manufacturing companies in Iran. *Journal of Safety Science*, 112, 206–212.
- Gilchrist, A. (2016). Introducing Industry 4.0. *Industry 4.0* (195–215). Consulté le juin 2016, tiré de https://doi.org/10.1007/978-1-4842-2047-4_13.<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162518315737#bb0375>.
- Gisbert, J.R., Palau, C., Uriarte, M., Prieto, G., Palazón, J.A., Esteve, M., López, O.J., Correas, Lucas-Estañ, M.C., Giménez, P., Moyano, A., Collantes, L., Gozávez, J., Molina, B., Lázaro, O., González, A. (2014). Integrated system for control and monitoring industrial wireless networks for labor risk prevention. *Journal of Network and Computer Applications*, 39, 233-252.

- Goossens, P. (2017). *Industry 4.0 and the Power of the Digital Twin*. Maplesoft. Consulté le 14 septembre 2017, tiré de <https://www.maplesoft.com/ns/manufacturing/industry-4-0-power-of-the-digital-twin.aspx>.
- Gouvernement de l'Alberta (2020). *Leading Indicators for Workplace Health and Safety: a user guide*. Consulté le 9 septembre 2020, tiré de <https://open.alberta.ca/dataset/0998a751-ab73-497c-a1a8-4ed321eef963/resource/99b1c0d2-779d-4f11-a325-184e89b0be80/download/lbr-leading-indicators-for-workplace-health-and-safety-user-guide-2020>.
- Gouvernement du Québec (2021a). *Règlement sur la santé et la sécurité du travail* (Chapitre S-2.1, r.13). Consulté le 6 octobre, tiré de <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cr/S-2.1,%20r.%2013>.
- Gouvernement du Québec (2021c). *Loi sur la santé et la sécurité du travail*, S-2.1. Gouvernement du Québec. Consulté le 6 octobre 2016, tiré de <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cs/S-2.1>.
- Gouvernement du Québec (2016b). *Loi sur les accidents du travail et les maladies professionnelles*, A-3. Consulté le 6 octobre, tiré de <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cs/A-3.001>.
- Granerud, L., Rocha, R.S. (2011). Organisational learning and continuous improvement of health and safety in certified manufacturers. *Journal of Safety Science*, 49, 1030–1039.
- Gyorgy, K., Kot, S. (2016). New logistics and production trends as the effect of global economy changes. *Polish Journal of Management Studies*, 14, 115–26.
- Gouvernement du Canada (2021). *Principales statistiques relatives aux petites entreprises*. Gouvernement of Canada. Consulté le décembre 2021, tiré de <https://ised-isde.canada.ca/site/recherche-statistique-pme/fr/principales-statistiques-relatives-aux-petites-entreprises/principales-statistiques-relatives-aux-petites-entreprises-2021>.

- Gupta, S. (2017). *The Security risks with augmented Reality and ways to combat*. My Story. Consulté le 14 février 2017, tiré de <https://yourstory.com/mystory/21b7cafae1-the-security-risks-with-augmented-reality-and-ways-to-combat/amp>.
- Haight, J.M. (2020). Adaptive automation and its health and safety challenges. *Journal of Safety Research*, 74, 149–152.
- Hämäläinen, P., Saarela, K.L., Takalab, J. (2009). Global trend according to estimated number of occupational accidents and fatal work-related diseases at region and country level. *Journal of Safety Research*, 40 (2), 125–139.
- Hamzeh, R., Zhong, R., Xu, X.W. (2018). A Survey Study on Industry 4.0 for New Zealand Manufacturing. *Journal of Procedia Manufacturing*, 26, 49-57.
- Hasle, P., Limborg, H.J. (2006). A review of the literature on preventive occupational health and safety activities in small enterprises. *Journal of Industrial Health*, 44, 6-12.
- He, H., Maple, C., Watson, T., Tiwari, A., Mehnen, J., Jin, Y., Gabrys, B. (2016). The Security Challenges in the IoT enabled Cyber-Physical Systems and Opportunities for Evolutionary Computing & Other Computational Intelligence. *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. Vancouver. Consulté le juillet 2016, tiré de <https://www.researchgate.net/publication/311255937>.
- Health Service Executive (HSE). (2008). *Risk Assessment Tool and Guidance (OQR012)*. UK. Consulté le juin 2008, tiré de <http://www.hse.ie>.
- Hearn, M., Rix, S. (2019). Cybersecurity Considerations for Digital Twin Implementations. *Journal of Innovation*. Consulté le novembre 2019, tiré de <https://www.iiconsortium.org/news-pdf/joi-articles/2019-November-JoI-Cybersecurity-Considerations-for-Digital-Twin-Implementations.pdf>.
- Hébert, P., Moudallal, M. (2016). *Plan d'action en économie numérique feuille de route industrie 4.0*. Gouvernement du Québec. Consulté l'octobre 2016, tiré de <https://www.economie.gouv.qc.ca>.

- Hobscheidt, D., Jürgenhake, C., Anacker, H., Dumitrescu, R. (2019). Sociotechnical solution patterns for the development of smart products. *Journal of Procedia CIRP*, 84, 638-643.
- Hofmann, E., Rüsç, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Journal of Computers in Industry*, 89, 23-34.
- Horváth, D., Zs. Szabó, R. (2019). Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities?. *Journal of Technological Forecasting and Social Change*, 146, 119-132.
- Howard, J. (2019). *Artificial Intelligence: Implications for the Future of Work*. Centers for disease control and prevention (CDC). Consulté le 26 l'août 2019, tiré de <https://blogs.cdc.gov/niosh-science-blog/2019/08/26/ai/>.
- Hu, Y., Parhizkar, T., Mosleh, A. (2021). Guided simulation for dynamic probabilistic risk assessment of complex systems: Concept, method, and application. *Journal of Reliability Engineering and System Safety*, 217,108047.
- Huang, L. (2020). *Profil des PME statistiques démographiques du propriétaire*. Innovation, Science et Développement Économique Canada. Consulté le janvier 2020, tiré de <https://www.ic.gc.ca>.
- Institut de recherche Robert–Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST). (2017). *Robotique collaborative : Évaluation des fonctions de sécurité et retour d'expérience des travailleurs, utilisateurs et intégrateurs au Québec*. Consulté le mai 2017, tiré de <https://www.irsst.qc.ca>.
- Issa, A., Lucke, D., Bauernhansl, T. (2017). Mobilizing SMEs towards Industrie 4.0-enabled Smart Products. *The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, (63,670-674). *Procedia CIRP*. Consulté le 11 juillet 2017, tiré de <https://www.sciencedirect.com>.
- Jazdi, N. (2014). Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*. Cluj-Napoca, Consulté le mai 2014, tiré de <https://doi.org/10.1109/AQTR.2014.6857843>.

- Jeyaraj, A., Subramanian, N. (2018). Recent security challenges in cloud computing. *Journal of Computers and Electrical Engineering*, 71, 28–42.
- Kaassis, B., Badri, A. (2018). Development of a preliminary model for evaluating occupational health and safety risk management maturity in small and medium-sized enterprises. *Journal of Safety*, 4 (1), 1-20.
- Kadir, B.A., Broberg, O., Conceicao, C.S. (2019). Current research and future perspectives on human factors and ergonomics in Industry 4.0. *Journal of Computers & Industrial Engineering*, 137, 106004.
- Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J. (2013). *Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*. the Industrie 4.0 Working Group. Consulté le avril 2013, tiré de [https:// www.academia.edu](https://www.academia.edu).
- Khan, A., Turowski, K. (2016). A Survey of Current Challenges in Manufacturing Industry and Preparation for Industry 4.0. *the First International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’16)*, 1, 15-26, Consulté le janvier 2016, tiré de <https://www.researchgate.net/publication/301611136>.
- Kiel, D., Arnold, C., Voigt, K-I. (2017). The influence of the industrial internet of things on business models of established manufacturing companies – a business level perspective. *Journal of Technovation*, 68, 4-19.
- Kim, K., Alshair, M., Holtkamp, B., Yun, C., Khalafi, A., Song, L., Jae Suh, M. (2019). Using Immersive Augmented Reality to Assess the Effectiveness of Construction Safety Training. *KICEM Journal of Construction Engineering and Project Management*, 9 (4), 16-33.
- Knudsen, M.S., Kaivo-oja, J.R.L. (2020). Collaborative Robots: Frontiers of Current Literature. *Journal of Intelligent Systems Theory and Applications*, 3(2), 13-20.
- Kolla, S., Minufekr, M. Plapper, P. (2019). Deriving essential components of lean and industry 4.0 assessment model for manufacturing SMEs. *Journal of Procedia CIRP*, 81, 753-758.

- Köhler, D., Weisz, J.D. (2016). *The digital transformation of the Industrie: a Franco-German Issue*. Ifri. Consulté le décembre 2018, tiré de [https:// www.ifri.org](https://www.ifri.org).
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.G., Feld, T., Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Journal of Business & Information Systems Engineering*, 6, 239-242.
- Law, W.K., Chan, A.H.S., Pun, K.F. (2006). Prioritising the safety management elements A hierarchical analysis for manufacturing enterprises. *Journal of Industrial Management & Data Systems*, 106 (6), 778-792.
- Lee, J., Davari, H., Singh, J., Pandhare, V. (2018). Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing Systems. *Journal of Manufacturing*, 18, 20–23.
- Legg, S.J., Olsen, K.B., Laird, I.S., Hasle, P. (2015). Managing safety in small and medium enterprises. *Journal of Safety Science*, 71, 189–196.
- Legg, S., Battisti, M., Harris, L.A., Laird, I., Lamm, F., Massey, C., Olsen, K. (2009). *Occupational health and safety in small businesses*. NOHSAC (ISSN 1177-2239). Wellington: NOHSAC. Tiré de <https://www.scribd.com>.
- Leyh, C., Bley, K., Schäffer, T., Forstenhäusler, S. (2016). SIMMI 4.0 - a maturity model for classifying the enterprise-wide it and software landscape focusing on Industry 4.0. *Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*, Consulté l'octobre 2016, tiré de <https://www.semanticscholar.org/paper/SIMMI-4.0-a-maturity-model-for-classifying-the-it-Leyh-Sch%C3%A4ffer/e505439f5ae370c2acbf015b050fe0c4f50139c0>
- Lorenz, M., Rübmann, M., Strack, R., Lasse Lueth, K., Bolle, M. (2015). *Man, and Machine in Industry 4.0: How Will Technology Transform the Industrial Workforce Through 2025?*. The Boston Consulting Group. Consulté le septembre 2015, tiré de [https:// www.image-src.bcg.com](https://www.image-src.bcg.com).
- Li, X., Yi, W., Chi, H-L., Wang, X., Chan, A.P.C. (2018). A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety. *Journal of Automation in Construction*, 86, 150–162.

- Lingard, H., Wakefield, R., Cashin, P. (2011). The development and testing of a hierarchical measure of project OHS performance. *Journal of Engineering Construction & Architectural Management*, 18 (1), 30–49.
- Liu, M., Fang, S., Dong, H., Xu, C. (2020a). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial Applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346-361.
- Liu, Z., Xie, K., Li, L., Chen, Y. (2020b). A paradigm of safety management in Industry 4.0. *Journal of systems research and behavioral science*, 37 (4), 632-645.
- Linli, L., Hao, L., Fu, G., Ning, D., Xinjian, G., Guofu, L. (2019). Multidisciplinary collaborative design modeling technologies for complex mechanical products based on digital twin. *Journal of Computer Integrated Manufacturing System*, 25 (6), 1307-1319.
- Lu, Y., Liu, C., Wangc, K. I-Kai., Huanga, H., Xua, X. (2019). Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Journal of Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 6 1, 101837.
- MacEachen, E., Kosny, A., Scott-Dixon, K., Facey, M., Chambers, L., Breslin, C., Kyle, N., Irvin, E., Mahood, Q. (2010). Workplace health understandings and processes in small businesses: a systematic review of the qualitative literature. *Journal of Occupational Rehabilitation*, 20 (2), 180–198.
- Masi, D., Cagno, E. (2015). Barriers to OHS interventions in Small and Medium-sized Enterprises. *Journal of Safety Science*, 71, 226 241.
- Mehrpouya, M., Vosooghnia, A., Dehghanghadikolaei, A., Fotovvati, B. (2021). The benefits of additive manufacturing for sustainable design and production. *Sustainable Manufacturing*, 29-59.
- Melesse, T.Y., Di Pasquale, V., Riemma, S. (2020). Digital Twin Models in Industrial Operations: A Systematic Literature. *Journal of Procedia Manufacturing*, 42, 267-272.

- Merayo, D., Rodríguez-Prieto, A., Camacho, A.M. (2019). Comparative analysis of artificial intelligence techniques for material selection applied to manufacturing in Industry 4.0. *Journal of Procedia Manufacturing*, 41, 42–49.
- Micheli, G.J.L., Cagno, E. (2010). Dealing with SMEs as a whole in OHS issues: Warnings from empirical evidence. *Journal of Safety Science*, 48 (6), 729-733.
- Ministère de l'Économie et de l'Innovation du Québec (MEIQ). (2019). *Industrie 4.0 : les nouvelles technologies, un levier de compétitivité pour les entreprises manufacturières*. Bulletin Espace Conseils PME. Québec, Tiré de <https://www.economie.gouv.qc.ca/bibliotheques/outils/gestion-dune-entreprise/industrie-40/industrie40-les-nouvelles-technologies-un-levier-de-competitivite-pour-les-entreprises-manufacturieres/>.
- Moeuf, A., Lamouri, S., Pellerin, R., Eburdy, R., Tamayo, S. (2018). Industry 4.0 and the SME: a technology-focused review of the empirical literature. *7th International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*. Saarbrücken. Consulté l'octobre 2018, tiré de <https://www.researchgate.net/publication/326345441>.
- Mohajan, H. (2019). The First Industrial Revolution: Creation of a New Global Human Era. *Journal of Social Sciences and Humanities*, 5 (4), 377-387.
- Moore, S.J., Nugent, C.D., Zhang, S., Cleland, I. (2020). IoT reliability: a review leading to 5 key research. *Journal of CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction*, 2, 147–163.
- Moore, V.P. (2019). *Artificial Intelligence: Occupational Safety and Health and the Future of Work*. European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA). Tiré de <https://www.stjornarradid.is>.
- Moreno-Cabezali, B.M., Fernandez-Crehuet, J.M. (2020). Application of a fuzzy logic-based model for risk assessment in additive manufacturing R&D projects. *Journal of Computers & Industrial Engineering*, 145, 106529.

- Mourtzis, D., Zogopoulos, V., Vlachou, E. (2017). Augmented Reality Application to Support Remote Maintenance as a Service in the Robotics Industry. *Journal of Computer Science*, 63, 46-51.
- Mourtzis, D., Papakostas, N., Mavrikios, D., Makris, S., Alexopoulos, K. (2015). The role of simulation in digital manufacturing: applications and outlook. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(1), 3-24.
- Mu-Hsing Kuo, A. (2011). Opportunities and Challenges of Cloud Computing to Improve Health Care Services. *Journal of Medical Internet Research*, 13 (3), e67.
- Müller, M., Buliga, O., Voigt, K. (2020). The role of absorptive capacity and innovation strategy in the design of industry 4.0 business Models - A comparison between SMEs and large enterprises. *Journal of European Management*, 39(3), 333-343.
- Nagarajan, H.P., Panicker, S., Mokhtarian, H., Coatanéa, E., R.Haapala, K. (2020). Improving worker health and safety in wire arc additive manufacturing: A graph-based approach. *Journal of Procedia CIRP*, 90, 461–466.
- Naylor, S. (2019). *Rise in industry use of AI technologies in workplaces and future challenges for health and safety*. Discovering Safety. Consulté 11 le septembre 2019, tiré de <https://www.discoveringsafety.com/blogs/rise-industry-use-ai-technologies-workplaces-and-future-challenges-health-and-safety-part-1>.
- Ndjoulou, F. (2018). *Pérennisation de la prise en charge de la santé et de la sécurité au travail par les entreprises*. L'université de Sherbrooke et l'Université du Québec à Trois-Rivières, Sherbrooke, Québec, Canada, Consulté l'août 2018, tiré de <https://savoirs.usherbrooke.ca>.
- Neely, A.D., Mills, J.F., Gregory, M.J., Platts, K.W. (1995). Performance measurement system design—a literature review and research agenda. *International Journal of Operations & Production Management*, 15 (4), 80–116.
- Neumann, W. P., Winkelhaus, S., Grosse, E. H., Glock, C. H. (2021). Industry 4.0 and the human factor – A systems framework and analysis methodology for successful development. *International Journal of Production Economics*, 233, 107992.

- Ning, H., Liu, H. (2015). Cyber-physical-social-thinking space-based science and technology framework for the Internet of things. *Journal of Science China Information Sciences*, 58, 1-19.
- Ninness, J. (2018). Augmented reality may transform mining safety. *Journal of Australasian Mine Safety*. tiré de <https://www.amsj.com.au/augmented-reality-transform-mining-safety/>.
- Nyirenda, V., Chinniah, Y., Agard, B. (2015). Identifying Key Factors for an Occupational Health and Safety Risk estimation Tool in Small and Medium-size Enterprises. *Journal of IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 541–546.
- Abioye, S., O. Oyedele, L., Akanbi, L., Ajayi, A., Delgado, J.M.D., Bilal, M., O. Akinade, O., Ahmed, A. (2021). Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges. *Journal of Building Engineering*, 44, 103299.
- Oliveira, J.P., Santos, T.G., Miranda, R.M. (2020). Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice. *Journal of Progress in Materials Science*, 107.
- O'Toole, M., (2002). The relationship between employees' perceptions of safety and organizational culture. *Journal of Safety Research*, 33, 231–243.
- Paolini, A., Kollmannsberger, S., Rank, E. (2019). Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods. *Journal of Additive Manufacturing*, 30, 100894.
- Pedersen, M.R., Nalpantidis, L., Andersen, R.S., Schou, C., Bøgh, S., Krüger, V., Madsen, O. (2016). Robot skills for manufacturing: from concept to industrial deployment. *Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 37, 282–291.
- Perales, D.P., Valero, F.A., García, A.B. (2018). Industry 4.0: A Classification Scheme. *International Joint Conference - CIO-ICIEOM-IIE-AIM*, 343-350, Consulté le janvier 2018, tiré de <https://www.researchgate.net/publication/319176066>.
- Peres, R.S., Jia, X., Lee, J., Sun, K., Colombo, A.W., Barata, J. (2020). Industrial Artificial Intelligence in Industry 4.0 - Systematic Review, Challenges and Outlook. *Special*

section on advanced artificial intelligence technologies for smart manufacturing.

Consulté le décembre 2020, tiré de <https://www.researchgate.net/publication/34691503>.

Peres, R.S., Rocha, A.D., Leitao, P., Barata, J. (2018). IDARTS – Towards intelligent data analysis and real-time supervision for industry 4.0. *Journal of Computers in Industry*, 101, 138–146.

Partnership for European Research on Occupational Safety and Health (PEROSH). (2012). *Sustainable workplaces of the future – European research challenges for occupational safety and health*. Tiré de <https://www.perosh.eu>.

Pettitt, G., Westfall, S., (2016). The advantages of integrating major hazard safety and impact assessments for pipeline projects. *11th International Pipeline Conference*. Alberta, Consulté le septembre 2016, tiré de <https://www.researchgate.net/publication/330378707>.

Pinto, B., Silva, F.J.G., Costa, T., Campilho, R.D.S.G., Pereira, M.T. (2019). A Strategic Model to take the First Step Towards Industry 4.0 in SMEs. *Journal of Procedia Manufacturing*, 38, 637-645.

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.

Podgórski, D. (2015). Measuring operational performance of OSH management system – A demonstration of AHP-based selection of leading key performance indicators. *Journal of Safety Science*, 73, 146–166.

Posada, J., Toro, C., Barandiaran, I., Oyarzun, D. (2015). Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet. *IEEE engineering in medicine and biology magazine: the quarterly magazine of the Engineering in Medicine & Biology Society*, 35 (2) 26–40.

- Rampersad, G., (2020). Robot will take your job: Innovation for an era of artificial intelligence. *Journal of Business Research*, 116, 68–74.
- Rashedi, A., Al-Hakim, L., Shamsuddin, A. (2018). Collaborative Robotics in Industry 4.0: A Survey. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(6), 1217-1239.
- Rajkumar, R., I. Lee, L. Sha, Stankovic, J. (2010). Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution. *Proceedings of the 47th Design Automation Conference*. California. Consulté le janvier 2010, tiré de https://www.researchgate.net/publication/221062579_44.
- Rauschnabel, P.A., Felix, R., Hinsch, C. (2019). Augmented reality marketing: how mobile AR-apps can improve brands through inspiration. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 49, 43–53.
- Redinger, C.F., Levine, S.P., (1998). Development and evaluation of the Michigan occupational health and safety management system assessment instrument: a universal OHSMS performance measurement tool. *Journal of American Industrial Hygiene Association*, 59 (8), 572–581.
- Redingerab, C. F., Levineb, S.P., Blotzer, M. j., Majewskid, M.P. (2002). Evaluation of an Occupational Health and Safety Management System Performance Measurement Tool-III: Measurement of Initiation Elements. *Journal of AIHA*, 63, 41-46.
- Reiman, T., Pietikäinen, E. (2012). Leading indicators of system safety – monitoring and driving the organizational safety potential. *Journal of Safety Science*, 50 (10), 1993–2000.
- Rejeski, D., Zhao, F., Huang, Y. (2018). Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing, *Journal of Additive Manufacturing*, 19, 21–28.
- Ribeiro, J., Lima, R., Eckhardt, T., Paiva, S. (2021). Robotic Process Automation and Artificial Intelligence in Industry 4.0 – A Literature review. *Journal of Procedia Computer Science*, 181, 51–58.
- Robson, L.S., Ibrahima, S., Hogg-Johnson, S., Ivan Steenstra, A., Van Eerd, D., Amick, B.C. (2017). Developing leading indicators from OHS management audit data:

- Determining the measurement properties of audit data from the field. *Journal of Safety Research*, 61, 93–103.
- Robson, L. S., Macdonald, S., Gray, G.C., Van Eerd, D. L., Bigelow, P.L. (2012). A descriptive study of the OHS management auditing methods used by public sector organizations conducting audits of workplaces: implications for audit reliability and validity. *Journal of Safety Science*, 50 (2), 181–189.
- Rodic, B. (2017). Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm. *Journal of Organizacija*, 50 (3),193-207.
- Rodriguez, R.R., Alfaro Saiz, J. J., Ortiz Bas, A. (2009). Quantitative relationships between key performance indicators for supporting decision making processes. *Journal of Computers in Industry*, 60 (2), 104–113.
- Russell, S.J., Norvig, P. (2011). Artificial intelligence: a modern approach, 3rd ed. *Journal of Artificial Intelligence*, 175, 935-937.
- Roy, M., Cadieux, J., Fortier, L., Leclerc, L. (2008). *Validation d'un outil d'autodiagnostic et d'un modèle de progression de la mesure en santé et sécurité du travail* (ISBN : 978-2-89631-312-9). Montréal : Institut de recherche Robert Sauve en santé and sécurité du travail (IRSST). Consulté l'octobre 2010, tiré de <https://www.irsst.qc.ca>.
- Roy, M., Bergeron, S., Fortier, L. (2004). *Développement d'instruments de mesure de performance en santé et sécurité du travail à l'intention des entreprises manufacturières organisées en équipes semi-autonomes de travail*. Montréal : Institut de recherche Robert Sauve en santé and sécurité du travail (IRSST). Consulté le Février 2004, tiré de <https://www.irsst.qc.ca>.
- Salguero-Caparrós, F., Pardo-Ferreira, M.C., Martínez-Rojas, M., Rubio-Romero, J.C. (2020). Management of legal compliance in occupational health and safety. A literature reviews. *Journal of Safety Science*, 121, 111–118.
- Salkin, C., Rix, M., Ustundag, A., Cevikcan, E. (2018). A Conceptual Framework for Industry 4.0. *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation*. 3-23, Consulté le septembre 2018, tiré de <https://www.researchgate.net/publication/319862610>.

- Santos, V.M.R., Thompson, A., Sims-Waterhouse, D., Maskery, I., Woolliams, P., Leach, R. (2020). Design and characterisation of an additive manufacturing benchmarking artefact following a design-for-metrology approach. *Journal of Additive Manufacturing*, 32.
- Santos, G., Barros, S., Mendes, F., Lopes, N. (2013). The main benefits associated with health and safety management systems certification in Portuguese small and medium enterprises post quality management system certification. *Journal of Safety Science*, 51, 29–36.
- Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., Wartzack, S. (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *Journal of CIRP Annals*, 66, 141–144.
- Schmidt, R., Möhring, M., Härting, R.C., Reichstein, C., Neumaier, P., Jozinović, P., (2015). Industry 4.0-potentials for creating smart products: empirical research results. *18th International Conference on Business Information Systems*, 208, 16-27, Consulté le juin 2015, tiré de <https://www.researchgate.net/publication/274894802>.
- Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., Hompel, M.T., Wahlster, W. (2017). *Industrie 4.0 Maturity Index Managing the Digital Transformation of Companies*. Munich: acatech STUDY. Consulté l'avril 2017, tiré de <https://www.acatech.de>.
- Schumacher, A., Erol, S., Sihm, W. (2016). A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Journal of Procedia CIRP*, 52, 161–166.
- Sezer, O.B., Dogdu, E., Ozbayoglu, A.M. (2018). Context-Aware Computing Learning, and Big Data in Internet of Things: A Survey, *IEEE Internet Things*, 5 (1), 1–27.
- Sgourou, E., Katsakiori, P., Goutsos, S., Manatakis, E. (2010). Assessment of selected safety performance evaluation methods in regard to their conceptual, methodological and practical characteristics. *Journal of Safety Science*, 48, 1019–1025.
- Simard, M., Marchand, A. (1997). Workgroups' propensity to comply with safety rules: the influence of micro-macro-organisational factors. *Journal of Ergonomics*, 40 (2), 172–188.

- Simon, T., A. Aguilera, G., Zhao, F. (2017). Characterization of particle emission from fuse deposition modeling printers. *12th International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Consulté le juin 2017, tiré de <https://www.researchgate.net/publication/318665530>.
- Simon (2020). *Industry 1.0 to 4.0 – Brief History of the Industrial Revolution*. Consulté le 12 janvier 2020, tiré de <https://sustainability-success.com/industry-1-0-to-4-0-2-3-revolution/>.
- Sinclair, R.C., Cunningham, T.R., Schulte, P.A. (2013). A Model for Occupational Safety and Health Intervention Diffusion to Small Businesses. *American Journal of Industrial Medicine*, 56(12).
- Sony, M. (2020). Pros and cons of implementing Industry 4.0 for the organizations: a review and synthesis of evidence. *Journal of Production & Manufacturing Research*, 8 (1), 244–272.
- STIQ (2020). *Le Baromètre Industriel Québécois*, 11e Edition. Québec. Tiré de <https://www.stiq.com>.
- Sturm, L.D., Williams, C. B., Camelio, J. A., White, J., Parker, R. (2017). Cyber-physical vulnerabilities in additive manufacturing systems: A case study attack on the. STL file with human subjects. *Journal of Manufacturing Systems*, 44, 154–164.
- Sturm, L., Williams, C., Camelio, J., White, J., Parker, R. (2014). Cyber-physical vulnerabilities in additive manufacturing systems. *International Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin: University of Texas. Consulté le 18 novembre 2014, tiré de <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/89238?show=full>.
- Sunarti, S., Fadzlul Rahman, F., Naufal, M., Risky, M, Febriyanto, K., Masnina, R. (2021). Artificial intelligence in healthcare: opportunities and risk for future. *Journal of Gaceta Sanitaria*, 35 (1), 67–70.
- Suri, K., Cuccuru, A., Cadavid, J., Gérard, S., Gaaloul, W., Tata, S. (2017). Model-based development of modular complex systems for accomplishing system integration for industry 4.0. *5th International Conference on Model-Driven Engineering and*

- Software Development*, 487-495, Portugal. Consulté le février 2017, tiré de <https://www.researchgate.net/publication/314522974>.
- Syberfeldt, A., Danielsson, O., Holm, M., Wang, L. (2015). Dynamic operator instructions based on augmented reality and expert systems. *48th CIRP Conference on manufacturing system*. Consulté le june 2015, tiré de https://www.researchgate.net/publication/280836937_Dynamic_operator_instructions_based_on_augmented_reality_and_expert_systems.
- Syberfeldt, A., Danielsson, O., Holm, M., Wang, L. (2016). Support Systems on the Industrial Shopfloors of the Future – Operators’ Perspective on Augmented Reality. *6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS)*. Consulté le May 2016, tiré de https://www.researchgate.net/publication/302922049_Support_Systems_on_the_Industrial_Shop-floors_of_the_Future_-_Operators%27_Perspective_on_Augmented_Reality.
- Tan, K.H., Ortiz-Gallardo, V.G., Perrons, R.K. (2016). Using Big Data to manage safety-related risk in the upstream oil & gas industry: A research agenda. *Journal of Energy Exploration & Exploitation*, 34 (2), 282–289.
- Tao, F., Zhang, M. (2017). Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. *IEEE Access*, 5, 20418–20427.
- Tao, F., Qi, Q. (2018). Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0:360 Degree Comparison. *Journal of IEEE Access*, 6, 3585-3593.
- Tchernykh, A., Schwiegelsohn, U., Talbi, E-G., Babenko, M. (2019). Towards understanding uncertainty in cloud computing with risks of confidentiality, integrity, and availability. *Journal of Computational Science*, 36, 100581.
- Thoben, K-D., Wiesner, S., Wuest, T. (2017). “Industrie 4.0” and Smart Manufacturing – A Review of Research Issues and Application Examples. *International Journal of Automation Technology*, 11 (1), 4-19.
- Torn, A.R., Vaneker, T.H.J. (2019). Mass Personalization with Industry 4.0 by SMEs: a concept for collaborative networks. *Journal of Procedia Manufacturing*, 28, 135-141.

- Tremblay, A., Badri, A. (2018). Assessment of occupational health and safety performance evaluation tools: State of the art and challenges for small and medium-sized enterprises. *Journal of Safety Science*, 101, 260-267.
- Turk, Z., García de Soto, B., R.K. Mantha, B., Maciel, A., Georgescu, A. (2021). A systemic framework for addressing cybersecurity in construction. *Journal of Automation in Construction*, 133, 103988.
- Turing, A.M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Journal of Mind*, 59 (236), 433-460.
- Nekhoda, E.V., Kuklina, T.V. (2020). Occupational Safety and Health in Digital Economy: Challenges for Government Regulation. *54th International Scientific Conference on Economic and Social Development*. Novosibirsk. Consulté le mai 2020, tiré de [https:// www.vital.lib.tsu.ru](https://www.vital.lib.tsu.ru).
- Vaio, A.D., Hassan, R., Alavoine, C. (2021). Data intelligence and analytics: A bibliometric analysis of human–Artificial intelligence in public sector decision-making effectiveness. *Journal of Technological Forecasting & Social Change*, 174, 121201.
- Van Assen, M., Lee, S.J., De Cecco, C.N. (2020). Artificial intelligence from A to Z: From neural network to legal framework. *European Journal of Radiology*, 129, 109083.
- Van Lopik, K., Sinclair, M., Sharpe, R., Conway, P., West, A. (2019). Developing augmented reality capabilities for industry 4.0 small enterprises: Lessons learnt from a content authoring case study. *Journal of Computers in Industry*, 117.
- Vinodkumar, M.N., Bhasi, M. (2011). A study on the impact of management system certification on safety management. *Journal of Safety Science*, 49, 498–507.
- Vogl, G.W., Weiss, B.A., Helu, M. (2016). A review of diagnostic and prognostic capabilities and best practices for manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30, 79-95.
- Vrchota, J., Volek, T., Novotná, M. (2019). Factors Introducing Industry 4.0 to SMES. *Journal of Social Sciences*, 8(5).

- Weber, R.H., Weber, R. (2010). Technicity of the Internet of Things. *Internet of Things: Legal Perspectives*, 2-17. London: Springer. Consulté le 24 juin 2010, tiré de <https://www.dhi.ac.uk>.
- Wienbruch, T., Leineweber, S., Kreimeier, D., Kuhlenkötter, B. (2018). Evolution of SMEs towards Industrie 4.0 through a scenario-based learning factory training. *Journal of Procedia Manufacturing*, 23, 141-146.
- Wittenberg, C. (2016). Human-CPS Interaction – requirements and human-machine interaction methods for the industry 4.0. *Journal of IFAC-PapersOnLine*, 49 (19), 420–425.
- Wynstra, F., Spring, M., Schoenherr, T. (2015). Service triads: A research agenda for buyer–supplier–customer triads in business services. *Journal of Operations Management*, 35, 1-20.
- Yang, T., Yi, X., Lu, S., H. Johansson, K., Chai, T. (2021). Intelligent Manufacturing for the Process Industry Driven by Industrial Artificial Intelligence. *Journal of Engineering*, 7, 1224–1230.
- Zimmermann, N., Lentjes, J., Werner, A. (2019). Analysis of Requirements, Potentials and Risks Caused by Using Additive Manufacturing. *Journal of Procedia Manufacturing*, 39, 474–483.
- Zhang, Q., Sharma, G., Wong, J.P., Davis, A.Y., Black, M.S., Biswas, P., Weber, R.J. (2018). Investigating particle emissions and aerosol dynamics from a consumer fused deposition modeling 3D printer with a lognormal moment aerosol model. *Journal of Aerosol Science and Technology*, 52 (10), 1099–1111.
- Zhaohao, S., Kenneth, D.S., Pambel, F. (2018). Privacy and security in the big data paradigm. *Journal of Computer Information Systems*, 60 (3),1-10.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Certificat d'éthique de la recherche avec les êtres humains



3950

CERTIFICAT D'ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE AVEC DES ÊTRES HUMAINS

En vertu du mandat qui lui a été confié par l'Université, le Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains a analysé et approuvé pour certification éthique le protocole de recherche suivant :

Titre : **Étude exploratoire des opportunités et des menaces en santé et sécurité du travail en contexte de transformation des entreprises manufacturières vers l'Industrie 4.0**

Chercheur(s) : Maral Haj Mohammadhosseini
 Département de génie industriel
 Adel Badri
 Département de génie industriel

Organisme(s) : CRSNG (Programme de subventions à la découverte) et l'UQTR (FIR Développement de laboratoires de recherche)

N° DU CERTIFICAT : **CER-22-285-07.15**

PÉRIODE DE VALIDITÉ : **Du 21 avril 2022 au 21 avril 2023**

En acceptant le certificat éthique, le chercheur s'engage à :

- Aviser le CER par écrit des changements apportés à son protocole de recherche avant leur entrée en vigueur;
- Procéder au renouvellement annuel du certificat tant et aussi longtemps que la recherche ne sera pas terminée;
- Aviser par écrit le CER de l'abandon ou de l'interruption prématurée de la recherche;
- Faire parvenir par écrit au CER un rapport final dans le mois suivant la fin de la recherche.

Me Richard LeBlanc
Président du comité

Fanny Longpré
Secrétaire du comité

Décanat de la recherche et de la création

Date d'émission : 21 avril 2022

ANNEXE 2 : Questionnaire - Étude exploratoire des opportunités et des menaces en
SST des technologies de l'Industrie 4.0

Étude exploratoire des opportunités et des menaces en SST des technologies 4.0

Nom : _____

Code permanent : _____

CARACTÉRISTIQUES DE VOTRE ENTREPRISE

* Dans quel secteur manufacturier opère votre entreprise ?

- Ressources naturelles (bois, papier, produits minéraux non métalliques et transformation des métaux)
- Produits de consommation (aliments, boissons et tabac, textiles, produits textiles, vêtements, cuir, caoutchouc et plastique, produits métalliques et meubles)
- Transformation complexe (impression, pétrole et charbon, produits chimiques, machines, produits informatiques et électroniques, matériel et appareils électriques, matériel de transport et activités diverses)

* Votre entreprise compte combien de travailleurs dans son effectif ?

- 20 à 49 50 à 99 100 à 299 300 à 499

* Quel est le chiffre d'affaires moyen annuel en millions de dollars (M\$) de votre entreprise ?

- Moins de 1 M\$
- Entre 1 et 4 M\$
- Entre 5 et 14 M\$
- Entre 15 et 29 M\$
- Entre 30 et 49 M\$
- plus de 50 M\$

* Votre entreprise dispose-t-elle d'une personne-ressource qui gère la santé et la sécurité du travail (SST) ?

- Oui Non

* Cette personne-ressource gère la SST selon quel régime ?

- À temps complet À temps partiel

QUELQUES INFORMATIONS SUR VOUS

* Quelle est votre fonction ?

Mots : Caractères : / 1000

* Depuis combien de temps travaillez-vous dans votre entreprise actuelle ?

- 1 à 3 ans 4 à 6 ans 7 à 9 ans Plus de 10 ans

* Quel est votre niveau scolaire ?

- Collégial
- Baccalauréat
- Maîtrise
- Doctorat
- Autre

* Avez-vous reçu une formation en SST ?

- Oui Non

VOTRE PRISE EN CHARGE DE LA SST

* Votre entreprise réalise-t-elle des analyses de risques en SST ?

Oui Non

* À quel moment votre entreprise réalise-t-elle ces analyses de risques en SST ?

- Chaque fois qu'un nouveau procédé ou équipement est introduit
 Chaque fois qu'il y a un changement de procédés, d'outil, de machines, etc.
 Chaque fois qu'il y a une modification de l'aménagement interne

* Votre entreprise dispose-t-elle d'un registre pour les accidents de travail survenus ?

Oui Non

* Quel est le nombre de cas d'accidents déclarés depuis 5 ans ?

* Parmi les accidents du travail cités ci-dessous, cochez celles qui sont survenues dans votre entreprise :

- Blessures (fracture, coupure, amputation, par le bruit, etc.)
 Brûlure (électrique, chimique ou par la chaleur)
 Explosions
 Chocs électriques
 Décès
 Autres accidents

* Quelles sont les sources de dangers qui sont présentes dans votre environnement de travail ou qui sont impliquées fréquemment dans des accidents de travail dans votre entreprise ?

- Mécaniques (éléments en mouvement, écrasement ou coincement par élément mobile, etc.)
 Électriques (électricité à courant continu ou alternatif, électricité statique, etc.)
 Physiques et chimiques (milieu poussiéreux ou restreints, ambiance sonore, éléments sous pression, etc.)
 Cyberattaques (logiciels malveillant, abus des privilèges des utilisateurs, etc.)
 Méthodes du travail (tâches à risques, tâches répétitives, etc.)
 Humaines (comportements à risque, erreurs humaines, etc.)
 Contraintes réglementaires (absences de normes ou de lois, normes anciennes non adaptées, etc.)

VOTRE MISE EN ŒUVRE DE L'INDUSTRIE 4.0

* Comment décririez-vous le niveau de mise en œuvre de l'Industrie 4.0 au sein de votre entreprise ?

- Aucune stratégie n'existe
 Initiatives pilotes lancées
 Stratégie en développement
 Stratégie définie
 Stratégie définie et mise en œuvre

* Avez-vous déjà investi un budget afin de mettre en œuvre des stratégies reliées à l'Industrie 4.0 ?

Oui Non

1/1/23, 3:17 PM

Questionnaire « Étude exploratoire des opportunités et des menaces en SST des technologies 4.0 »

* Les stratégies reliées à l'Industrie 4.0 mises en œuvre dans votre entreprise sont reliées à quels départements ou services ?

- Recherche et développement
 Production/Fabrication
 Achat
 Logistique
 Ventes
 Service
 Technologie de l'information

* Avez-vous pensé à des projets futurs d'investissement dans votre entreprise reliés à l'Industrie 4.0 dans l'avenir ?

- Oui Non

* Ces projets d'investissement seront planifiés sur combien d'années ?

- 1 à 2 ans
 3 à 5 ans
 5 ans et plus

* Dans votre entreprise, profitez-vous ou comptez-vous profiter de quels concepts de l'Industrie 4.0 ?

- Usine intelligente : intégration des systèmes cyber physiques et automatisés afin de collecter des données provenant de la machinerie et des processus de production.
 Opérations intelligentes : des processus de production répondant de manière autonome/automatique et en temps réel aux changements dans les conditions de production.
 Produits intelligents : des produits équipés de fonctionnalités complémentaires basées sur des technologies de l'information et des communications, afin de communiquer et d'interagir avec des systèmes de plus haut niveau, et tout le long de la chaîne de production
 Cueillette et utilisation des données : des services axés sur la cueillette et utilisation des données, grâce à l'intégration des produits, des systèmes et de la machinerie de production et du service à la clientèle

VOTRE MISE EN ŒUVRE DE L'INDUSTRIE 4.0

Comment évaluez-vous les compétences spécifiques de vos employés face à l'Industrie 4.0 ?

	Non existante	Existante, mais insuffisantes	Existante et adéquate
* Infrastructure informatique	<input type="checkbox"/> Non existante	<input type="checkbox"/> Existante, mais insuffisantes	<input type="checkbox"/> Existante et adéquate
* Technologie d'automatisation	<input type="checkbox"/> Non existante	<input type="checkbox"/> Existante, mais insuffisantes	<input type="checkbox"/> Existante et adéquate
* Analyse des données	<input type="checkbox"/> Non existante	<input type="checkbox"/> Existante, mais insuffisantes	<input type="checkbox"/> Existante et adéquate
* Sécurité des données et des communications	<input type="checkbox"/> Non existante	<input type="checkbox"/> Existante, mais insuffisantes	<input type="checkbox"/> Existante et adéquate
* Développement de systèmes d'assistance	<input type="checkbox"/> Non existante	<input type="checkbox"/> Existante, mais insuffisantes	<input type="checkbox"/> Existante et adéquate
* Logiciel de collaboration	<input type="checkbox"/> Non existante	<input type="checkbox"/> Existante, mais insuffisantes	<input type="checkbox"/> Existante et adéquate

	* Compétences non techniques comme celles reliées à la compréhension globale des systèmes et des processus	<input type="checkbox"/> Non existante	<input type="checkbox"/> Existante, mais insuffisantes	<input type="checkbox"/> Existante et adéquate
--	--	--	--	--

VOTRE MISE EN ŒUVRE DE L'INDUSTRIE 4.0

* Avez-vous déjà utilisé les technologies de l'Industrie 4.0 dans votre entreprise ?

- Oui
 Non

* Sélectionnez les technologies l'Industrie 4.0 que vous utilisez actuellement et indiquez si vous avez eu des accider travail liés à l'utilisation de ces technologies depuis 5 ans.

(Dans le cas où vous avez répondu par Non ou en l'absence d'accidents du travail liés à une technologie, mentionne dans le nombre d'accidents et dans la colonne des causes)

Technologies de l'Industrie 4.0	Actuellement	Nombre d'accidents	Causes
Mégadonnées	▼	<input type="text"/>	<input type="text"/> Mots : Caractères : / 4000
Intelligence artificielle	▼	<input type="text"/>	<input type="text"/> Mots : Caractères : / 4000
Robotique collaborative (Cobotique)	▼	<input type="text"/>	<input type="text"/> Mots : Caractères : / 4000
Simulation	▼	<input type="text"/>	<input type="text"/> Mots : Caractères : / 4000
Internet des objets ou des services et Systèmes cyber physiques	▼	<input type="text"/>	<input type="text"/> Mots : Caractères : / 4000
Infonuagique (Cloud Computing)	▼	<input type="text"/>	<input type="text"/> Mots : Caractères : / 4000
Réalité augmentée	▼	<input type="text"/>	<input type="text"/> Mots : Caractères : / 4000
Jumeaux numériques	▼	<input type="text"/>	<input type="text"/> Mots : Caractères : / 4000
Fabrication additive	▼	<input type="text"/>	<input type="text"/> Mots : Caractères : / 4000

* Quelles technologies de l'industrie 4.0 comptez-vous utiliser ou continuer à utiliser dans l'avenir ?

- Mégadonnées
 Intelligence artificielle
 Robotique collaborative (Cobotique)
 Simulation

1/1/23, 3:17 PM

Questionnaire « Étude exploratoire des opportunités et des menaces en SST des technologies 4.0 »

- Internet des objets ou des services
- Systèmes cyber physiques
- Informatique (Cloud Computing)
- Réalité augmentée
- Jumeaux numériques
- Fabrication additive

VOTRE VISION DES OPPORTUNITÉS DES TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE 4.0

En contexte de l'industrie 4.0, le changement technologique **peut améliorer** la santé et la sécurité des travailleurs.

Selon vous, quelle est l'importance de chacune des **opportunités** des **Mégadonnées et Informatique** répertoriées ci-dessous pour la SST ?

	En désaccord	Ni en accord ni en désaccord	En accord
* Aide à une prise de décision rapide	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Aide à l'amélioration des performances	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Aide à l'augmentation de la sécurité et de la stabilité du système	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Capable d'analyser le comportement des individuels et d'identifier les comportements à risques	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Capable de prédire les erreurs du système avant qu'elles ne deviennent un danger	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Capable de gérer les risques professionnels du système	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord

Selon vous, quelle est l'importance de chacune des **opportunités** de l'**Intelligence Artificielle** répertoriées ci-dessous pour la santé et la sécurité des travailleurs ?

	En désaccord	Ni en accord ni en désaccord	En accord
* Aide à l'amélioration de l'efficacité des programmes de formation	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Capable de prendre des décisions en temps réel	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Aide à la reconnaissance rapide des dangers	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Capable d'évaluer les risques	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Aide à l'identification des risques psychosociaux en temps réel	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Aide à la détection des anomalies du réseau afin de réduire l'impact des cyberattaques	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord

1/1/23, 3:17 PM

Questionnaire « Étude exploratoire des opportunités et des menaces en SST des technologies 4.0 »

Selon vous, quelle est l'importance de chacune des **opportunités** de la **Cobotique** répertoriées ci-dessous pour la santé et la sécurité des travailleurs ?

	En désaccord	Ni en accord ni en désaccord	En accord
* Aide à l'élimination des tâches répétitives, ardues et dangereuses et à la création d'un environnement ergonomique	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Capable d'interagir de manière plus flexible et indépendante avec les humains ainsi que les robots	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord

Selon vous, quelle est l'importance de chacune des **opportunités** de la **Simulation** répertoriées ci-dessous pour la santé et la sécurité des travailleurs ?

	En désaccord	Ni en accord ni en désaccord	En accord
* Aide à la prévention des risques par l'estimation de la probabilité et de la gravité des dangers liés aux machines et aux travailleurs dans différents scénarios	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Aide à minimiser les risques de production, le stress et la perte de temps liés au travail en anticipant les effets des changements dans les processus de production	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Aide à réaliser des processus plus ergonomiques, sécuritaires et pratiques pour la main-d'œuvre	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord

Selon vous, quelle est l'importance de chacune des **opportunités** de l'**Internet des objets** ou des **services** et des **Systèmes cyberphysiques** répertoriées ci-dessous pour la santé et la sécurité des travailleurs ?

	En désaccord	Ni en accord ni en désaccord	En accord
* Peut détecter les dangers avant qu'ils ne surviennent	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Aide à la réduction des effets physiologiques des travaux répétitifs et lourds	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Aide au contrôle et à l'amélioration des performances des équipements intelligents de protection individuelle ou collective	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Capable de collecter des métadonnées, de sauvegarder et d'évaluer un grand volume de données reliés à la SST en temps réel	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Aide à détecter les erreurs grâce à la communication en temps réel entre les machines	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord

Selon vous, quelle est l'importance de chacune des **opportunités** de la **Réalité augmentée** répertoriées ci-dessous pour la santé et la sécurité des travailleurs ?

	En désaccord	Ni en accord ni en	En accord

1/1/23, 3:17 PM

Questionnaire « Étude exploratoire des opportunités et des menaces en SST des technologies 4.0 »

		désaccord	
* Aide à la collecte de données en temps réel sur le lieu de travail	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Capable d'identifier les zones dangereuses, les scénarios de risques et l'évaluation des risques en temps réel à l'aide d'algorithmes basés sur des données	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Aide à améliorer la performance des équipements de protection individuelle grâce à la capacité de recueillir des informations environnementales en temps réel	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Capable d'améliorer les programmes de formation et éviter les risques	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Capable de fournir les instructions nécessaires pour améliorer la précision lors de la maintenance et réduire les erreurs évitables	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord

Selon vous, quelle est l'importance de chacune des **opportunités** des **Jumeaux numériques** répertoriées ci-dessous pour la santé et la sécurité des travailleurs ?

	En désaccord	Ni en accord ni en désaccord	En accord
* Capable de mettre à jour simultanément les mouvements des humains et des équipements pour éviter les erreurs	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Capable d'analyser l'ergonomie des travailleurs, d'attribuer des tâches et de mieux localiser	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Capable de simuler les environnements à risque afin d'identifier les dangers et les effets secondaires de l'environnement réel	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Aide les opérateurs à se former sur une machine virtuelle sans risques pour eux-mêmes et pour la machine	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Capable de détecter instantanément l'écart fonctionnel du modèle existant avec le système physique réel	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord

Selon vous, quelle est l'importance de chacune des **opportunités** de la **Fabrication Additive** répertoriées ci-dessous pour la santé et la sécurité des travailleurs ?

	En désaccord	Ni en accord ni en désaccord	En accord
* Aide à la réduction des phénomènes mécaniques dangereux des machines conventionnelles et des phénomènes dangereux associés aux pièces et outils en mouvement tels que l'écrasement, la coupe, la projection, etc.	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Aide à la réduction des risques de troubles musculosquelettiques (TMS) en évitant les efforts excessifs et répétitifs	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord

* S'il existe d'autres opportunités liées à des technologies de l'Industrie 4.0, prière de les indiquer (sinon mettre 0).

Mots : Caractères : / 4000

VOTRE VISION DES MENACES DES TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE 4.0

En contexte de l'industrie 4.0, le changement technologique peut **menacer** la santé et la sécurité du travail.

Selon vous, quelle est l'importance de chacune des **menaces** des **Mégadonnées** et de l'**Infonuagique** répertoriées ci-dessous pour la santé et la sécurité des travailleurs ?

	En désaccord	Ni en accord ni en désaccord	En accord
* Problèmes psychologiques comme le stress, la surcharge mentale et l'épuisement professionnel	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Blessures à cause des erreurs de données ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Problèmes de SST dus à l'absence de normes ou de règlements adaptés	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord

Selon vous, quelle est l'importance de chacune des **menaces** de l'**Intelligence Artificielle** répertoriées ci-dessous pour la santé et la sécurité des travailleurs ?

	En désaccord	Ni en accord ni en désaccord	En accord
* Problèmes psychologiques comme le stress, la surcharge mentale et l'épuisement professionnel	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Blessures à cause des erreurs de données ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Problèmes de SST dus à l'absence de normes ou de règlements adaptés	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord

Selon vous, quelle est l'importance de chacune des **menaces** de la **Cobotique** répertoriées ci-dessous pour la santé et la sécurité des travailleurs ?

	En désaccord	Ni en accord ni en désaccord	En accord
* Blessures dues à des mouvements imprévisibles ou des erreurs de données ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Blessures dues à des pannes mécaniques	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Blessures causées par des sources d'énergie pneumatique	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Blessures causées par des sources d'énergie hydraulique	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord

1/1/23, 3:17 PM

Questionnaire « Étude exploratoire des opportunités et des menaces en SST des technologies 4.0 »

	* Électrification ou chocs électriques	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
	* Troubles musculosquelettiques	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
	* Problèmes psychologiques comme le stress, la surcharge mentale, l'épuisement professionnel et l'anxiété	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
	* Blessures dues à l'absence de normes ou de règlements adaptés	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord

Selon vous, quelle est l'importance de chacune des **menaces** de la **Simulation** répertoriées ci-dessous pour la santé et la sécurité des travailleurs ?

		En désaccord	Ni en accord ni en désaccord	En accord
	* Blessures dues à des erreurs de données ou des écarts d'intégration ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
	* Blessures dues à l'absence de normes ou de règlements adaptés	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord

Selon vous, quelle est l'importance de chacune des **menaces** de l'**Internet des objets ou des services** et des **Systèmes cyberphysiques** répertoriées ci-dessous pour la santé et la sécurité des travailleurs ?

		En désaccord	Ni en accord ni en désaccord	En accord
	* Blessures physiques dues à des erreurs de données ou des écarts d'intégration ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
	* Problèmes psychologiques comme le stress, la surcharge mentale, l'épuisement professionnel et l'anxiété	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
	* Blessures dues à l'absence de normes ou de règlements adaptés	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord

Selon vous, quelle est l'importance de chacune des **menaces** de la **Réalité augmentée** répertoriées ci-dessous pour la santé et la sécurité des travailleurs ?

		En désaccord	Ni en accord ni en désaccord	En accord
	* Blessures dues à des erreurs de données ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique, limitations visuelles et de perception, étourdissement, fatigue, etc.	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
	* Blessures dues à l'absence de normes ou de règlements adaptés	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord

Selon vous, quelle est l'importance de chacune des **menaces** des **Jumeaux numériques** répertoriées ci-dessous pour la santé et la sécurité des travailleurs ?

1/1/23, 3:17 PM

Questionnaire « Étude exploratoire des opportunités et des menaces en SST des technologies 4.0 »

	En désaccord	Ni en accord ni en désaccord	En accord
* Blessures dues à des erreurs de données ou des écarts d'intégration ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Blessures dues à l'absence de normes ou de règlements adaptés	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord

Selon vous, quelle est l'importance de chacune des **menaces** de la **Fabrication Additive** répertoriées ci-dessous pour la santé et la sécurité des travailleurs ?

	En désaccord	Ni en accord ni en désaccord	En accord
* Blessures dues à des erreurs de données ou des écarts d'intégration ou des erreurs humaines ou à la sécurité informatique, incendies, brûlures, etc.	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Maladies professionnelles comme les problèmes respiratoires ou cutanés	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord
* Blessures dues à l'absence de normes ou de règlements adaptés	<input type="checkbox"/> En désaccord	<input type="checkbox"/> Ni en accord ni en désaccord	<input type="checkbox"/> En accord

* S'il existe d'autres menaces (accidents de travail ou maladies professionnelles) reliées à l'une des technologies de l'Industrie 4.0, prière de les indiquer (sinon mettre 0).

Mots : Caractères : / 4000

FIN DU QUESTIONNAIRE

ANNEXE 3 : Formulaire d'information et de consentement



FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT

Titre du projet de recherche :

Étude exploratoire des opportunités et des menaces en santé et sécurité du travail (SST) en contexte de transformation des entreprises manufacturières vers l'Industrie 4.0

Mené par :

Maral Haj Mohammadhosseini, Département de Génie industriel, maîtrise en ingénierie – concentration génie industriel, UQTR

Sous la direction de :

Adel Badri, Département de Génie industriel, UQTR, Directeur de recherche

Membres de l'équipe de recherche :

Foued Chihi, Département de Finance et Économique, UQTR, codirecteur de recherche

Source de financement :

CRSNG Découverte, UQTR (FIR LAB-LISST)

Déclaration de conflit d'intérêts :

N/A

Préambule

Votre participation à la recherche, qui vise à mieux comprendre les défis de SST en contexte de la transformation numérique des PME manufacturières au Québec, serait grandement appréciée. Cependant, avant d'accepter de participer à ce projet et de signer ce formulaire d'information et de consentement, veuillez prendre le temps de le lire. Il vous aidera à comprendre ce qui implique votre éventuelle participation à la recherche de sorte que vous puissiez prendre une décision éclairée à ce sujet.

Objectifs et résumé du projet de recherche

L'objectif principal de cette recherche est l'élaboration d'un portrait des opportunités et des menaces en SST des technologies de l'Industrie 4.0 en contexte de la transformation numérique des PME manufacturières québécoises. Pour atteindre cet objectif, il est prévu deux objectifs complémentaires. En premier lieu, l'élaboration d'une revue de la littérature afin de sortir avec un portrait initial des opportunités et menaces des technologies de l'Industrie 4.0 sur la SST découlant de la recherche en bibliothèque (objectif réalisé). En second lieu, l'implication de PME québécoises afin de préciser et d'améliorer ce portail préliminaire et le rendre plus adapté à la réalité du secteur manufacturier québécois.

Nature et durée de votre participation

Votre participation à ce projet de recherche consiste à remplir un questionnaire. Il devrait prendre environ 20 à 30 min pour le compléter.

La participation se fait en dehors des heures et du milieu de travail.

Risques et inconvénients

Aucun risque n'est associé à votre participation. Le projet de recherche n'engendre pas d'inconvénients (ex. déplacement, anxiété, fatigue, stress, inconfort) ou de risques pour les sujets (physiques, psychologiques, familiaux, professionnels, sociaux, économiques, politiques, autres). Le seul inconvénient est le temps qu'une personne passe à répondre au questionnaire et le nombre de minutes maximum pour remplir le questionnaire sera environ 20 à 30 minutes.

Avantages ou bénéfiques

En répondant au questionnaire, les participants contribuent à l'identification des opportunités et des menaces en SST reliées à l'utilisation des technologies de l'Industrie 4.0. Ils seront aussi capables de mettre en œuvre des mesures de prévention afin de protéger leurs travailleurs des menaces potentielles de ces technologies.

Compensation ou incitatif

Aucune compensation d'ordre monétaire n'est accordée. Il n'y aura aucune conséquence si vous décidez de quitter le projet en cours de route.

Confidentialité

Les données collectées par cette étude sont totalement confidentielles et ne conduiront pas à votre identification. Les résultats de l'étude seront publiés sans

fournir d'informations identifiantes. Seuls les chercheurs et étudiants impliqués dans la recherche auront accès aux données, et les données recueillies à l'Université du Québec à Trois-Rivières resteront confidentielles. Tous ont signé un engagement de confidentialité. Les données sont conservées conformément à la réglementation sur la tenue de registres et les salles de consultation des ingénieurs (c. L -9, r.14) de l'Ordre des Ingénieurs du Québec (OIQ). Ils seront détruits dans un délai de 10 ans et ne seront pas utilisés à des fins autres que celles décrites dans ce document.

Les informations personnellement identifiables contenues dans le dossier sont supprimées ou modifiées pour rendre les informations personnellement identifiables illisibles. Les documents papier sont détruits de telle manière qu'il n'est plus possible de reconstituer les informations. Les méthodes appropriées pour retirer/éliminer les documents papier sont : la combustion, le déchiquetage, puis le déchiquetage croisé, le malaxage et la pulvérisation. Pour les disques durs, les méthodes de destruction/élimination doivent détruire les données de façon permanente et irréversible. Les méthodes peuvent inclure l'écrasement des données avec une série de caractères ou le reformatage du disque (en supprimant tout ce qu'il contient). Le poudrage du disque dur est le meilleur moyen de se débarrasser des données du disque dur. Les données à stocker et à transférer vers un nouvel appareil ou appareil doivent être consultées avec votre fournisseur de support informatique local.

Participation volontaire

Votre participation à cette étude se fait sur une base volontaire. Vous êtes entièrement libre de participer ou non, de refuser de répondre à certaines questions ou de vous retirer en tout temps sans préjudice et sans avoir à fournir d'explications.

Le refus de participer n'aura pas de conséquences sur l'emploi du participant.

Remerciement

Votre collaboration est précieuse. Nous l'apprécions et vous en remercions.

Responsable de la recherche

Pour obtenir de plus amples renseignements ou pour toute question concernant ce projet de recherche, vous pouvez communiquer avec Maral Haj Mohammadhosseini par courriel : Maral.haj.mohammadhosseini@uqtr.ca

Surveillance des aspects éthiques de la recherche

Cette recherche est approuvée par le Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'Université du Québec à Trois-Rivières et un certificat portant le numéro CER-22-285-07.15 a été émis le 2022-04-21.

Pour toute question ou plainte d'ordre éthique concernant cette recherche, vous devez communiquer avec la secrétaire du comité d'éthique de la recherche de l'Université du Québec à Trois-Rivières, par téléphone (819) 376-5011, poste 2129 ou par courrier électronique CEREH@uqtr.ca.

CONSENTEMENT

Engagement de la chercheuse ou du chercheur

Moi, Maral Haj Mohammadhosseini, m'engage à procéder à cette étude conformément à toutes les normes éthiques qui s'appliquent aux projets comportant la participation de sujets humains.

Consentement du participant

En signant ci-dessous, vous vous engagez à :

- Avoir lu l'information;
- Être d'accord pour participer.

Oui, j'accepte de participer

ANNEXE 4 : Lettre d'invitation à répondre au questionnaire

Bonjour,

Je me présente Maral Haj Mohammadhosseini, étudiante à l'Université du Québec à Trois-Rivières en maîtrise en génie industriel.

Par suite de notre appel, et après votre accord, je vous ai envoyé **le formulaire de consentement** ci-joint. Veuillez bien lire et signer le formulaire de consentement, après l'accord, vous aurez accès au lien du questionnaire.

Ce questionnaire est sur « Étude exploratoire des opportunités et des menaces en SST des technologies 4.0 ».

Vous pouvez également transmettre cette invitation à vos collègues qui seront en mesure de répondre à votre place.

Je tiens aussi à vous préciser que vos données restent strictement confidentielles. Je compte sur votre collaboration.

Dans l'attente de votre réponse, je vous prie d'agréer mes salutations les plus distinguées.

ANNEXE 5 : Lettre de rappel aux PME

Madame, Monsieur,

Je suis Maral Haj Mohammadhosseini, étudiante à la maîtrise en génie industriel à l'UQTR sous la direction du professeur Adel Badri.

Je vous ai envoyé le questionnaire de recherche lors de l'appel téléphonique que j'ai entretenu avec vous. Le questionnaire est intitulé : « Étude exploratoire des opportunités et des menaces en SST des technologies 4.0 ».

Si vous avez rempli et transmis le questionnaire, prière d'omettre ce présent courriel et nous vous remercions pour votre temps.

Si vous ne l'avez pas encore commencé ou terminé, prière de le compléter en cliquant sur le même lien envoyé auparavant ou en utilisant le document ci-joint. Si vous avez de la difficulté pour répondre, nous serons heureux de répondre à vos questions.

Je vous remercie d'avance pour votre collaboration.