

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

ÉLABORATION D'UNE DÉMARCHE SYSTÉMATIQUE DE GESTION DES RISQUES  
DE SANTÉ ET SÉCURITÉ DU TRAVAIL ADAPTÉE AUX SYSTÈMES COMPLEXES  
EN TRANSFORMATION NUMÉRIQUE

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

PAR

WAEL ASSOUDI

Juillet 2025

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

**Codirection de recherche :**

---

Mme. Hind Bril El Haouzi, Ph. D.

Codirectrice de recherche, Université de Lorraine

**Jury d'évaluation :**

---

M. Adel Badri, Ph. D.

Directeur de recherche, UQTR

---

M. Jose Montes, Ph. D.

Département de génie industriel, UQTR

---

M. Lotfi Toubal, Ph. D.

Département de génie mécanique, UQTR

## **REMERCIEMENTS**

D'emblée, je souhaite adresser mes sincères remerciements à mon directeur de recherche à l'Université du Québec à Trois-Rivières, au Canada, Monsieur Adel Badri, pour son encadrement, ses conseils pertinents et son soutien tout au long de ce travail. Son expertise et sa rigueur m'ont permis de mener à bien ce mémoire.

Mes remerciements vont également à ma codirectrice à l'Université de Lorraine, en France, Madame Hind Bril El Haouzi, dont la rigueur scientifique et les observations judicieuses m'ont été d'un précieux soutien.

J'exprime également mes vifs remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à évaluer mon travail de recherche ainsi que pour la pertinence de leurs remarques.

Enfin, je tiens à remercier vivement ma famille pour son soutien indéfectible, sa patience et son encouragement constant à qui je dédie ce mémoire.

## RÉSUMÉ

Ce projet développe une démarche systématique de gestion des risques de santé et de sécurité du travail (SST), adaptée aux environnements industriels complexes en pleine transformation numérique. L'émergence de l'Industrie 4.0 entraîne une complexité accrue des systèmes techniques, organisationnels et humains. Cela accentue l'apparition des risques émergents, difficiles à cerner avec les approches traditionnelles d'analyse de la sécurité, spécifiquement en SST.

L'étude explore les concepts de la complexité, des systèmes complexes, de l'Industrie 4.0, de la SST pour étudier la gestion des risques de SST au contexte contemporain. Les méthodes traditionnelles d'analyse des risques révèlent une limitation face à des systèmes interconnectés et automatisés. Les approches de gestion des risques de SST doivent évoluer pour répondre aux enjeux de l'Industrie 4.0. Une analyse comparative entre diverses régions met en évidence des disparités en termes d'intégration de la SST et de maturité numérique.

Une démarche structurée est conçue, en réponse à ces constats, principalement fondée sur la pensée systémique et des méthodes d'analyse adaptées à la complexité. Dans cette optique, un outil opérationnel qui se compose en six modules est conçu, favorisant une meilleure compréhension systémique des dangers. Cet outil couvre l'identification des éléments du système, l'orientation stratégique de l'analyse des risques, les mesures de contrôle, et le suivi continu.

Cette approche contribue ainsi à l'anticipation des risques émergents, à l'adaptation des actions de prévention aux réalités numériques, et au renforcement de la capacité des entreprises à évoluer dans des environnements incertains et dynamiques. Afin d'améliorer durablement la performance de SST dans un contexte industriel en mutation, cette démarche conçue constitue ainsi une contribution concrète.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	I
RÉSUMÉ.....	II
TABLE DES MATIÈRES .....	III
LISTE DES TABLEAUX .....	VI
LISTE DES FIGURES.....	VIII
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	IX
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
<b>1. CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE .....</b>	<b>3</b>
1.1.    État de la situation .....	3
1.1.1.    Complexité et Systèmes complexes .....	3
1.1.2.    Industrie 4.0.....	10
1.1.3.    Santé et sécurité du travail .....	16
1.1.4.    Systèmes complexes et transformation numérique .....	27
1.1.5.    Entreprises québécoises, européennes et nord-africaines : analyse régionale comparée .....	36
1.2.    Risques à l'ère de l'Industrie 4.0.....	48
1.2.1.    Définitions et modèles.....	49
1.2.2.    Risque émergent .....	50
1.3.    Gestion des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0 .....	54
1.3.1.    Gestion des risques : fondements et principes .....	54
1.3.2.    Gestion des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0 .....	56
1.3.3.    Approches de gestion des risques de SST .....	59
<b>2. CHAPITRE 2 : PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE.....</b>	<b>66</b>
2.1.    Problématique de recherche .....	66
2.1.1.    Complexité croissante des systèmes en contexte de l'Industrie 4.0.....	66

2.1.2.	Émergence croissante des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0.....	67
2.1.3.	Limitation des approches de la gestion de risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0.....	68
2.1.4.	Différenciation du contexte régional des entreprises sujettes à l'étude .....	69
2.1.5.	Synthèse de la problématique.....	70
2.2.	Questions de recherche.....	70
2.3.	Objectifs de recherche .....	71
<b>3.</b>	<b>CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE .....</b>	<b>72</b>
3.1.	Démarche systématique de gestion des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0 .....	72
3.2.1.	Revue de la littérature .....	74
3.2.2.	Modélisation de la démarche systématique de gestion des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0.....	77
3.3.	Mise en place de la démarche systématique de gestion des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0.....	78
3.4.	Outil opérationnel pour la mise en œuvre de la démarche systématique dans l'entreprise .....	79
<b>4.</b>	<b>CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>	<b>80</b>
4.1.	Modélisation de la démarche systématique de gestion des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0.....	80
4.2.1.	Choix de l'entreprise ou du secteur d'application.....	82
4.2.2.	Identification des éléments du système.....	82
4.2.3.	Identification et évaluation des risques .....	83
4.2.4.	Orientation stratégique de l'analyse des risques .....	83
4.2.5.	Mise en place de mesures de contrôle et d'atténuation des risques .....	84

4.2.6.	Suivi, audit et réévaluation continue des risques .....	84
4.3.	Outil opérationnel pour la mise en œuvre de la démarche systématique dans l'entreprise .....	85
4.3.1.	Module 1 : Données générales de l'entreprise .....	86
4.3.2.	Module 2 : Identification des éléments du système .....	88
4.3.3.	Module 3 : Identification et évaluation des risques.....	90
4.3.4.	Module 4 : Orientation stratégique de l'analyse des risques.....	93
4.3.5.	Module 5 : Contrôle et atténuation des risques .....	94
4.3.6.	Module 6 : Suivi et réévaluation continue des risques.....	95
4.4.	Discussions et limites .....	96
	CONCLUSION GÉNÉRALE .....	99
	RÉFÉRENCES.....	100

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Les niveaux de complexité d'un système .....	5
Tableau 1.2 Comparaison des systèmes simples et des systèmes complexes .....	7
Tableau 1.3 Caractéristiques d'un système complexe.....	9
Tableau 1.4 Technologies clés de l'Industrie 4.0 .....	14
Tableau 1.5 SST à l'ère de l'Industrie 1.0 .....	18
Tableau 1.6 SST à l'ère de l'Industrie 2.0 .....	20
Tableau 1.7 SST à l'ère de l'Industrie 3.0 .....	21
Tableau 1.8 SST à l'ère de l'Industrie 4.0 .....	23
Tableau 1.9 Nombre de publications scientifique par thème .....	27
Tableau 1.10 Systèmes complexes et transformation numérique.....	29
Tableau 1.11 Maturité numérique dans les entreprises québécoises .....	38
Tableau 1.12 Maturité numérique dans les entreprises européennes .....	40
Tableau 1.13 Maturité numérique dans les entreprises nord-africaines .....	42
Tableau 1.14 SST dans les entreprises québécoises .....	44
Tableau 1.15 SST dans les entreprises européennes .....	46
Tableau 1.16 SST dans les entreprises nord-africaines .....	47
Tableau 1.17 Principaux modèles de risque utilisés dans les domaines professionnel et scientifique .....	49
Tableau 1.18 Combinaisons possibles entre les conditions Ci et les composants du risque pouvant former un risque émergent.....	51
Tableau 1.19 Méthodes traditionnelles de gestion de la sécurité .....	61
Tableau 1.20 Approches de gestion des risques basées sur la pensée complexe.....	64
Tableau 4.1 Données générales de l'entreprise .....	87
Tableau 4.2 Identification des éléments du système .....	88
Tableau 4.3 Étapes pour identification et évaluation des risques .....	90
Tableau 4.4 Risques à identifier .....	91
Tableau 4.5 Critères de classification des risques .....	91
Tableau 4.6 Catégories des risques.....	92
Tableau 4.7 Principe d'évaluation des risques .....	92

Tableau 4.8 Processus d'identification et d'évaluation des risques .....	93
Tableau 4.9 Orientation stratégique de l'analyse des risques.....	94
Tableau 4.10 Contrôle et atténuation des risques .....	95
Tableau 4.11 Suivi et réévaluation continue des risques .....	96

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1.1 Technologies clés de l'Industrie 4.0.....	13
Figure 1.2 Types des systèmes complexes .....	33
Figure 1.3 Exemples des systèmes complexes.....	34
Figure 1.4 Risque émergent, risque croissant, risque nouveau et risque traditionnel .....	52
Figure 1.5 Approche qualitative pour l'analyse des risques émergents basée sur une matrice de risque conséquence/incertitude et sur la nouvelle dimension de la connaissance.....	53
Figure 2.1 Problématique de la recherche .....	66
Figure 3.1 Démarche systématique de gestion des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0 .....	73
Figure 3.2 Élaboration de la revue de la littérature .....	74
Figure 3.3 Sources pour élaborer la revue de la littérature .....	77
Figure 4.1 Modélisation de la démarche systématique .....	81
Figure 4.2 Outil opérationnel pour la mise en œuvre de la démarche systématique dans l'entreprise.....	86

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

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

**FMEA** : Failure Mode and Effect Analysis

**FRAM** : Functional Resonance Analysis Method

**HAZOP** : Hazard and Operability Studies

**IA** : Intelligence artificielle

**IoT** : Internet des objets

**IR** : Risque croissant

**IRGC** : International Risk Governance Council

**NR** : Risque nouveau

**OIT** : Organisation internationale du travail

**PME** : Petite et moyenne entreprise

**RA** : Réalité augmentée

**RV** : Réalité virtuelle

**SGSST** : Système de gestion de la santé et de la sécurité du travail

**SI** : Système d'information

**SST** : Santé et sécurité du travail

**STAMP** : Systems-Theoretic Accident Model and Processes

**TIC** : Technologies de l'information et de la communication

**TICHNER** : Technique pour identifier et caractériser les risques émergents

**TR** : Risque traditionnel

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

La transformation numérique et l'avènement de l'Industrie 4.0 ont profondément transformé les environnements de travail, la production et les structures organisationnelles, notamment dans les entreprises industrielles. L'intégration de technologies avancées, de l'automatisation et de réseaux interconnectés implique une complexité accrue des systèmes. Dans cette optique, la gestion de la SST est confrontée à de nouveaux défis, principalement à la suite de l'émergence des risques spécifiquement en SST et la limitation des approches traditionnelles de l'analyse des risques pour gérer ces risques.

Dans ce contexte, il est crucial de développer une démarche systématique de gestion des risques de SST qui soit adaptée à la complexité et l'interconnexion des systèmes. Les différentes interactions entre les humains, les processus et les technologies numériques rendent l'anticipation et la prévision des mécanismes de défaillances plus difficile et ardue. Les approches traditionnelles de gestion des risques, souvent linéaires, ne sont plus aptes de gérer les risques au sein des systèmes complexes en pleine transformation numérique. Ainsi, une démarche tenant compte de la dynamique des systèmes et intégrant la pensée systémique s'avère indispensable pour garantir une gestion efficace et proactive des risques spécifiquement les risques émergents dans l'Industrie 4.0.

Face à cette réalité, ce projet de recherche vise à l'élaboration d'une démarche systématique de gestion des risques de SST adaptée à la complexité croissante des systèmes. Cette démarche est concrétisée via un outil pratique pour identifier, analyser, gérer et contrôler les risques dans des milieux industriels complexes. Elle se base sur l'orientation stratégique de l'analyse des risques selon leur nature, introduisant ainsi les approches systémiques, basées sur la pensée complexe, pour la gestion des risques pour les environnements complexes de l'Industrie 4.0 et montrant l'insuffisance des approches traditionnelles.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux. D'emblée, le premier chapitre expose une revue de la littérature qui étudie les systèmes complexes, la transformation numérique, l'Industrie 4.0, la SST et les divers liens entre ces notions. Il aborde également les risques à l'ère de l'Industrie 4.0 spécifiquement les risques émergents pour étudier ainsi la gestion des risques de SST à l'ère de l'Industrie 4.0 en termes des approches d'analyse de la sécurité, des normes et des politiques. Une analyse comparative du contexte régional dans différentes zones

en termes de maturité numérique et de SST est établie. Ensuite, le deuxième chapitre présente la problématique et les objectifs de recherche tout en révélant la limitation des approches actuelles de gestion des risques de SST en raison de la complexification croissante de l'Industrie 4.0. Ensuite, le troisième chapitre structure la méthodologie adoptée afin de concevoir et de mettre en œuvre la démarche systématique. Il expose les étapes de réalisation de la revue de la littérature, de la modélisation de la démarche et de la proposition de l'outil pratique applicable en entreprise. Enfin, le quatrième chapitre détaille les processus de modélisation, d'implémentation et d'opérationnalisation de la démarche systématique dans les milieux industriels dont la complexité est croissante. Il discute les atouts et les méfaits de cette démarche tout en proposant des perspectives amélioratives de cette démarche.

Cette étude montre une contribution novatrice à la gestion proactive des risques dans le contexte de l'Industrie 4.0. Elle vise à adopter une approche systémique des enjeux de la SST dans les environnements industriels complexes.

## 1. CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE

L'objectif principal de cette étude est de développer une démarche systématique de gestion des risques de SST spécifiquement adapté aux systèmes complexes en pleine transformation numérique. Ce travail comporte trois sections principales. De prime abord, la première section (section 1.1) étudie l'état de la situation. Ensuite, la deuxième section (section 1.2) se penche sur les risques à l'ère de l'Industrie 4.0. Enfin, la troisième section (section 1.3) se focalise sur la gestion de ses risques.

La revue de la littérature a été effectuée en utilisant la base de données Scopus, ainsi que le moteur de recherche Google Scholar. Parmi les mots-clés utilisés (en anglais et en français), nous citons : « système complexe », « transformation numérique », « Industrie 4.0 », « gestion des risques », « SST », « risque », « risque émergent », « organisationnel », « humaine » et « démarche systématique ». De cette recension des écrits, les articles scientifiques revus par les pairs, les rapports de recherche, les thèses ou les mémoires, les normes et les lois ont été inclus.

### **1.1. État de la situation**

Cette partie propose une vue d'ensemble des points clés nécessaires pour comprendre les enjeux de la SST dans le cadre de la transformation numérique et des systèmes complexes. Elle débute par une présentation de la complexité et des systèmes complexes, qui structurent les organisations modernes. Elle examine les processus de transformation numérique influençant ces systèmes. Par la suite, l'Industrie 4.0 est abordée pour évaluer son impact sur la SST. Enfin, un accent sur les entreprises québécoises, européennes et nord-africaines permettra une comparaison de la maturité numérique et des pratiques de SST dans ces contextes spécifiques.

#### **1.1.1. Complexité et Systèmes complexes**

Cette section présente les principaux concepts liés à la complexité dans les organisations. Elle commence par définir la notion de complexité, tout en explorant les différents niveaux qui la composent pour donner une vision globale des interactions et des interdépendances propres aux systèmes complexes par rapport aux systèmes simples. Enfin, elle différencie les systèmes complexes en général des systèmes sociotechniques.

### a) Notion de la complexité

La complexité est un champ d'études qui a connu un développement important dans les années 1980 avec la création de l'Institut de Santa Fe au Nouveau-Mexique. Son objectif était de développer une épistémologie capable de définir les interactions, les interconnexions et la connectivité entre les éléments d'un système, ainsi qu'entre le système lui-même et son environnement (Chan, 2001).

Cependant, il est crucial de noter que les recherches sur la complexité ont émergé bien avant cette période. En effet, en 1948, Weaver (1948) évoquait déjà la thématique de la complexité dans un essai fondateur portant sur la simplicité, la complexité désorganisée, la complexité organisée, etc. Cette distinction marque l'un des premiers jalons dans la conceptualisation des phénomènes de la complexité.

Divers auteurs abordent la complexité en la considérant sous l'angle de la quantité d'informations nécessaires pour décrire un système, ainsi que du nombre d'éléments et de la nature des interconnexions au sein de celui-ci (Magee & de Weck, 2004). La science de la complexité montre que les interactions entre les divers éléments d'un système engendrent des comportements complexes (Ladyman et al., 2013).

La notion de complexité aide à mieux comprendre le concept de système complexe. Un objet ou un processus est qualifié de compliquer lorsqu'il comprend de nombreux éléments interconnectés de manière difficile à analyser ou à appréhender. Il n'y a pas de définition unanimement reconnue du terme « complexe », et celui-ci est souvent employé sans clarification pour décrire des situations ou des idées. En tant que domaine d'étude, il se concentre principalement sur les comportements et les interactions globales d'un système dans son ensemble, plutôt que sur ses composants individuels (Bérard, 2009).

Les systèmes sont structurés en plusieurs niveaux de complexité, généralement classés en fonction des interactions entre les éléments du système, qui se manifestent à différentes échelles. Ces niveaux de complexité sont influencés par divers facteurs, tels que le nombre de composants dans un système, la nature des relations entre eux, la capacité d'adaptation du système à son environnement et la dynamique de leurs interactions. Cette approche favorise une compréhension plus globale du système, simplifiant la prise de décision et offrant une vue d'ensemble plus détaillée de son fonctionnement (Le Moigne, 1994). Le Tableau 1.1 classe les niveaux de complexité d'un système.

Tableau 1.1 Les niveaux de complexité d'un système (Le Moigne, 1994)

<b>Niveau de complexité d'un système</b>		<b>Description</b>
1	Système passif	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Différenciable et identifiable de son environnement</li> <li>- Pas d'autres actions à faire que de l'être</li> </ul>
2	Système actif	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Agir et réagir en fonction des sollicitations de son environnement</li> <li>- Se caractériser par son activité</li> </ul>
3	Système régulé	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maintenir une certaine régularité dans son activité</li> <li>- Incapable de gérer des informations</li> <li>- Des régularités émergent dans son activité</li> </ul>
4	Système informé	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Retenir des informations et les utiliser pour ajuster son comportement</li> <li>- Traiter l'information, ne pas l'interpréter et exécuter des commandes programmées</li> <li>- L'information émerge dans sa représentation</li> </ul>
5	Système décidé	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Non seulement capable de traiter, mais également d'interpréter des situations et à prendre des décisions</li> <li>- Système à caractère déterministe</li> <li>- Cybernétique (autorégulation adaptative)</li> <li>- Dispose de processus décisionnels émergents</li> </ul>
6	Système mémorisé	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Agir et formuler des décisions en se basant sur des informations accumulées lors de la prise en compte et du traitement d'événements provenant de l'extérieur</li> <li>- La mémoire émerge</li> <li>- Rôle essentiel de la communication</li> </ul>

Tableau 1.1 Les niveaux de complexité d'un système (Le Moigne, 1994) (suite)

Niveau de complexité d'un système	Description
7 Système coordonné	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le système organise les décisions d'actions en fonction des situations qui se présentent dans des activités variées</li> <li>- Les unités décisionnelles sont directement connectées aux événements, tout en influençant le système d'information (SI) pour initier des opérations</li> <li>- La coordination ou le pilotage émergent</li> </ul>
8 Système autoorganisé	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Système intelligent</li> <li>- Avoir la capacité d'imaginer et de développer de nouvelles manières d'agir</li> <li>- Retenir un historique des expériences précédentes et communiquer efficacement</li> <li>- Comportement heuristique</li> <li>- L'imagination et la capacité de s'autoorganiser émergent</li> </ul>
9 Système auto-finaliste	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disposer d'une conscience, ce qui permet au système de s'auto-finaliser</li> <li>- Aborder l'aspect humain, qui est le seul capable de modifier l'identité ou les finalités</li> <li>- La conscience et la capacité de se finaliser émergent</li> </ul>

### b) Système complexe

La littérature propose plusieurs définitions d'un système complexe. Il est souvent décrit comme un ensemble composé de nombreux éléments et de couches de sous-systèmes, avec de multiples interconnexions non linéaires, rendant leurs identification, gestion et prévision particulièrement difficiles (Johnson, 2006). Ce qui caractérise un système complexe, c'est l'émergence de comportements imprévisibles résultant des interactions entre ces différents éléments (Roy, 2018).

Un système complexe est composé de divers éléments, tels que des composants, des machines, des unités de production, des individus ou des groupes de personnes (Ladyman et al., 2013).

Les composants d'un système complexe interagissent non seulement les uns avec les autres, mais également avec leur environnement et les phénomènes émergents résultant de ces interactions (Newman, 2011).

La différence entre un système simple et un système complexe réside dans la quantité d'informations requises pour le décrire. En effet, la complexité d'un système découle des interactions entre ses éléments constitutifs et ne peut pas être trouvée à un endroit précis du système (Cilliers, 2002). Le Tableau 1.2 énumère quelques différences entre les systèmes simples et les systèmes complexes.

Tableau 1.2 Comparaison des systèmes simples et des systèmes complexes (Glouberman & Zimmerman, 2002)

Aspect du système	Simple	Complex
La théorie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Linéaire</li> <li>- Adaptation dans un environnement statique</li> <li>- Solution à l'extérieur du système</li> <li>- Absence de la tension, du bruit et des fluctuations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Non linéaire</li> <li>- Interactions dans un environnement dynamique</li> <li>- Solution fait partie du système</li> <li>- Occasions reliées au bruit, à la tension et aux fluctuations</li> </ul>
La causalité	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simple</li> <li>- Déterministe</li> <li>- Certain</li> <li>- Focalisation sur la fonction des différents composants</li> <li>- Résultats intentionnels et conçus</li> <li>- Prédiction bien assumée</li> <li>- Les structures déterminent les relations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mutuelle</li> <li>- Probabiliste</li> <li>- Incertain</li> <li>- Focalisation sur les relations entre les composants</li> <li>- Résultats émergents et adaptatifs</li> <li>- Non-prévisibilité des éléments</li> <li>- Relations et structures interactives</li> </ul>

Tableau 1.2 Comparaison des systèmes simples et des systèmes complexes (Glouberman & Zimmerman, 2002) (suite)

Aspect du système	Simple	Complex
La justification	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réductionnisme (analyse des composants)</li> <li>- Systèmes tendent vers l'équilibre, ce qui entraîne une évidence historique ignorée</li> <li>- Impertinence des déviants</li> <li>- Mesures d'alignement, d'efficacité et de meilleures pratiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Holisme (analyse du système dans son ensemble)</li> <li>- Changement et évolution basés sur des états antérieurs</li> <li>- Pertinence des déviants</li> <li>- Fonctionnement des boucles de rétroaction et des relations actuelles</li> </ul>
La planification	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pensée convergente</li> <li>- Caractéristiques déductives</li> <li>- L'enjeu est proportionnel à l'ampleur du changement</li> <li>- Scrutation de l'environnement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pensée divergente</li> <li>- Caractéristiques émergentes</li> <li>- Effet papillon (l'enjeu ne détermine pas l'ampleur du changement)</li> <li>- Développement de l'intuition dans la pratique</li> </ul>

Le Tableau 1.3 énumère d'une façon détaillée les caractéristiques multifacettes d'un système complexe.

Tableau 1.3 Caractéristiques d'un système complexe (Burton et al., 2021)

<b>Caractéristiques d'un système complexe</b>	<b>Description</b>
L'unité	Un ensemble de parties interconnectées où le tout est perçu comme étant plus que la simple somme de ses parties. Cela inclut les systèmes qui sont conçus de manière explicite.
Non-linéarité	Les entrées ou les perturbations dans un système peuvent entraîner une réponse proportionnelle, une réponse disproportionnée, ou parfois aucune réponse du tout.
Auto-organisation	Les composants internes d'un système se structurent pour produire un comportement global émergent, sans avoir besoin d'un contrôle centralisé, grâce aux interactions entre eux et avec leur environnement.
L'émergence	L'impossibilité de prévoir le comportement observé du système en s'appuyant uniquement sur la compréhension des éléments et de leurs relations.
Retour d'information couplé	Deux types de rétroactions se produisent simultanément : un retour d'information via l'environnement et un retour d'information interne, qui peut interagir et s'influencer mutuellement.
Autopoïèse	Le système est résilient face à la perte de ses composants internes et aux perturbations externes. Il a la capacité de se maintenir en état et de se reproduire.
Limites difficiles à définir	Tous les éléments du système (personnes, informations, matières, etc.) peuvent entrer et sortir du système. Les limites du système, qui sont susceptibles de varier, sont souvent difficiles à définir.
Transition de mode	Sans modifications de l'environnement ou sans présence d'un déclencheur clairement identifiable, le comportement systémique du système peut changer de manière radicale.
Inertie	Les interventions ou les perturbations dans un système peuvent ne pas produire d'effets immédiatement visibles en raison d'un délai pendant lequel aucun impact n'est perceptible.

Certains auteurs considèrent un système sociotechnique comme un système complexe en raison de ses propriétés émergentes, des relations non linéaires entre ses éléments, et des phénomènes associés qui peuvent avoir des causes multiples et des conséquences relativement imprévues (Hettinger et al., 2015). Il est perçu comme un exemple de système adaptatif complexe, car il intègre divers éléments sociaux et techniques en interaction dynamique, dont les caractéristiques émergentes peuvent être décrites comme une fonction non linéaire de ses activités intégrées (Carayon et al., 2015).

Les systèmes complexes préfigurent l'émergence de l'Industrie 4.0, qui intègre des technologies avancées, comme les cyber-systèmes et l'Internet des objets (IoT). Cette transition permet aux entreprises de devenir plus intelligentes et autonomes, en facilitant la gestion des processus et des risques à travers une interconnexion accrue.

### **1.1.2. Industrie 4.0**

Cette section présente l'Industrie 4.0 en détaillant à la fois sa définition et ses principes, ainsi que les technologies qui en sont les moteurs. Nous commencerons par explorer le concept et l'impact de cette révolution industrielle avant d'introduire les principales technologies, telles que l'IoT, l'intelligence artificielle (IA) et la robotique, qui transforment les processus de production et ouvrent la voie à de nouvelles possibilités pour l'industrie.

#### **a) Introduction à l'Industrie 4.0**

L'Industrie 4.0 est un concept émergent, issu des avancées technologiques et des innovations disruptives dans le secteur industriel. L'expression « Industrie 4.0 » a été mentionnée pour la première fois dans un document diffusé en novembre 2011 par le gouvernement allemand, dans le cadre d'un projet visant à établir une stratégie technologique avancée pour 2020 (Kagermann et al., 2013).

L'industrie a connu des changements majeurs ces dernières années, principalement à cause des innovations continues et des progrès révolutionnaires dans les secteurs de la technologie numérique et de la production. L'Industrie 4.0 se place dans la continuité des trois premières révolutions industrielles qui ont marqué les siècles précédents (Schmidt et al., 2015).

Les révolutions industrielles ont constitué des étapes déterminantes dans l'évolution des méthodes de production. La première révolution industrielle, fréquemment désignée sous le terme de l'Industrie 1.0, s'est distinguée par l'apparition de la machine à vapeur, qui a

révolutionné les méthodes de production en boostant considérablement la productivité grâce à l'usage de la mécanique. La deuxième révolution industrielle, souvent désignée sous le terme de l'Industrie 2.0, a été marquée par l'introduction de l'électrification dans les usines, facilitant la production de masse en utilisant l'électricité pour alimenter les machines et optimiser l'efficacité des chaînes de montage. La troisième révolution industrielle, fréquemment désignée sous le terme de l'Industrie 3.0, s'est caractérisée par l'automatisation des processus de fabrication, rendue réalisable grâce aux avancées dans le domaine de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication (TIC). Cette révolution a permis une gestion plus flexible et efficace des opérations industrielles (Von Tunzelmann, 2003). La quatrième révolution industrielle, souvent désignée sous le terme de l'Industrie 4.0, se distingue par des transformations rapides et disruptives dans divers domaines, notamment les communications en réseau, la fabrication numérique, l'automatisation, et les technologies informatiques, parmi d'autres aspects connexes (Zhou et al., 2015).

Ce nouveau paradigme industriel intègre diverses avancées technologiques, telles que les systèmes cyber-physiques, la robotique, l'IoT, les données massives et la réalité virtuelle (RV). Ces dernières années, l'intérêt scientifique pour ces technologies a considérablement augmenté. Elles auront un impact significatif sur les produits et les processus, offrant aux entreprises qui les adopteront des opportunités pour améliorer leur productivité et leur efficacité (Schmidt et al., 2015)

En outre, l'Industrie 4.0 entraînera des transformations majeures dans les secteurs industriel et manufacturier, impactant ainsi profondément les chaînes de valeur. Elle générera également de nombreuses opportunités en termes de technologies de production, de modèles d'affaires et d'organisation du travail (Lasi et al., 2014).

Dans le cadre de l'Industrie 4.0, la production se caractérise par une intégration omniprésente où chaque composant de la fabrication communique de manière autonome, déclenche des actions et se régule indépendamment (Weyer et al., 2015). Cette approche de la fabrication, visant à créer des processus plus intelligents, se distingue par des réseaux de production décentralisés et numérisés qui fonctionnent sans intervention humaine. Ces réseaux contrôlent de manière autonome leurs opérations en réponse aux changements et aux exigences de leur environnement (Erol et al., 2016).

L'Industrie 4.0 constitue une approche profondément novatrice qui combine les mondes physique et numérique. Bien que les chercheurs et les entreprises puissent avoir des

perspectives diverses sur le concept de l'Industrie 4.0 et ses visions associées, il existe un consensus général sur les principaux aspects de la fabrication future : produits intelligents, usines intelligentes, modèles d'affaires évolutifs, et clients connectés (Qin et al., 2016).

D'après les connaissances actuelles, l'Industrie 4.0 doit être considérée comme un concept intégratif qui englobe divers composants, technologies et perspectives associées aux réseaux de valeur. Plutôt que de l'envisager comme un système fermé ou isolé, l'Industrie 4.0 doit être appréhendée comme un concept fondamental qui s'inscrit dans un cadre plus large de domaines essentiels. Cette perspective souligne l'importance de l'Industrie 4.0, non seulement en tant que collection de technologies ou de processus séparés, mais également en tant qu'élément essentiel qui améliore et connecte divers aspects de la production et des opérations industrielles (Bartodziej, 2017).

Effectivement, l'Industrie 4.0 se distingue par une intégration fluide des processus opérationnels et des chaînes de valeur, facilitant ainsi la création de réseaux flexibles et durables (Ustundag et al., 2018). Cela implique que les technologies de l'Industrie 4.0 sont élaborées pour opérer et interagir de manière harmonieuse et fluide, favorisant une synergie renforcée entre les différents éléments de la chaîne de valeur. L'objectif est de développer des réseaux industriels interconnectés et intelligents qui, tout en facilitant la flexibilité et l'efficacité, encouragent également une approche plus durable et résiliente de la production (Ávila-Gutiérrez et al., 2022).

L'Industrie 4.0 vise quatre objectifs clés pour la production et le fonctionnement des entreprises : optimiser l'efficacité, accroître l'agilité, garantir la sécurité et promouvoir la durabilité environnementale (Qian et al., 2017). Le modèle de production fondé sur l'Industrie 4.0, tout en optimisant la qualité et l'efficacité des processus, peut également renforcer la sécurité, promouvoir la durabilité et améliorer l'image de l'industrie (Oesterreich & Teuteberg, 2016). L'Industrie 4.0 facilite une organisation de la production en temps réel et une régulation dynamique autonome, contrairement à la planification classique qui s'appuie sur des prévisions fixes (Sanders et al., 2016).

## b) Technologies clés de l'Industrie 4.0

Le Tableau 1.4 présente plusieurs technologies clés qui contribuent à la transformation numérique des systèmes complexes dans le cadre de l'Industrie 4.0. Chaque technologie est décrite brièvement, mettant en évidence son rôle et ses applications spécifiques dans

l'optimisation des processus industriels. Ces technologies incluent l'IoT, l'IA, les données massives, l'informatique en nuage, la cybersécurité, la RV et la robotique, toutes essentielles pour améliorer l'efficacité, la sécurité et l'innovation dans les environnements industriels modernes. Parmi celles-ci, les technologies illustrées dans la Figure 1.1 sont particulièrement remarquables.

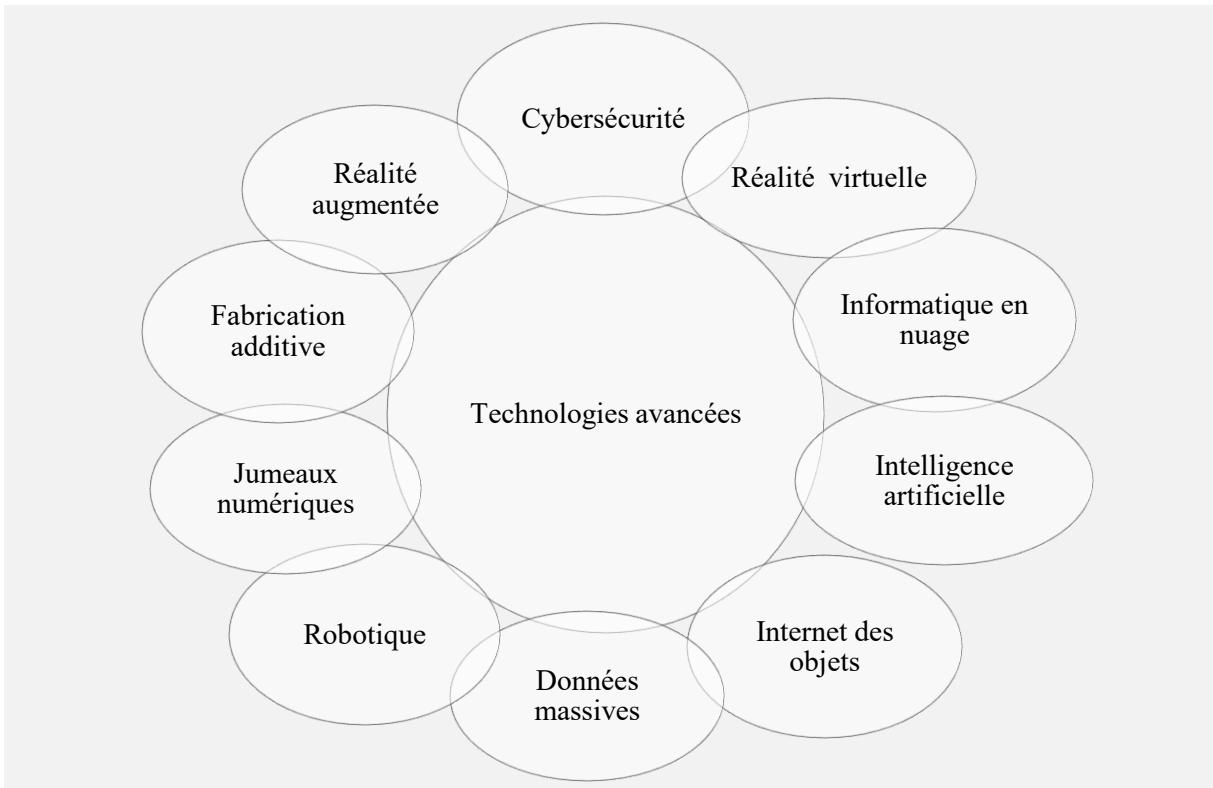


Figure 1.1 Technologies clés de l'Industrie 4.0

Tableau 1.4 Technologies clés de l'Industrie 4.0

Technologie	Concept	Références
IoT	Les solutions IoT (capteurs, actionneurs, dispositifs interconnectés, etc.) permettent de recueillir des informations en temps réel sur l'environnement, de surveiller et de gérer les équipements physiques. Ces outils offrent une communication fluide et rigide entre les infrastructures, les machines, et les opérateurs afin de favoriser une gestion anticipative des ressources et des processus.	(Lampropoulos et al., 2019), (Madakam et al., 2015), (Manavalan & Jayakrishna, 2019).
IA	Les solutions IA (machine learning, deep learning, etc.) jouent un rôle important dans l'optimisation des performances, l'automatisation des prises de décision, et l'amélioration des interactions utilisateurs. L'IA permet de repérer les anomalies, adapter les opérations aux exigences changeantes, et prévenir les défaillances.	(Javaid et al., 2022), (Jan et al., 2023), (Lee et al., 2018), (Peres et al., 2020).
Données massives	Les solutions d'analyse des données massives permettent de traiter des quantités énormes de données provenant de diverses sources. Ces outils technologiques favorisent une grande capacité pour identifier des schémas pertinents, extraire des informations exploitables et prendre des décisions stratégiques dans des environnements complexes et interconnectés.	(Manogaran et al., 2017), (Gokalp et al., 2016), (Khan et al., 2017).
Informatique en nuage	L'informatique en nuage fournit des ressources informatiques fiables, flexibles et disponibles à la demande. Elle contribue à optimiser les coûts d'infrastructure. Elle offre un stockage sécurisé, en soutenant les opérations des systèmes numériques avancés.	(Kim, 2017), (Aceto et al., 2020), (Manogaran et al., 2017).

Tableau 1.4 Technologies clés de l'Industrie 4.0 (suite)

Technologie	Concept	Références
Cybersécurité	Les solutions de cybersécurité sont essentielles pour protéger les informations sensibles. Elles permettent de sécuriser les infrastructures numériques. Ces solutions agissent efficacement aux menaces de cyberattaques. Elles permettent de garantir l'intégrité, la confidentialité, et la disponibilité des données.	(Thames & Schaefer, 2017), (Kim, 2017).
RV	Les solutions de la RV permettent de concevoir des environnements immersifs destinés à améliorer les simulations, la formation et l'expérience utilisateur. Ces technologies sont utilisées pour renforcer la collaboration à distance et tester des scénarios avant leur mise en œuvre réelle.	(Roldán et al., 2019), (Liagkou et al., 2019), (Paszkiewicz et al., 2021).
Robotique	Les systèmes robotiques (robots industriels, drones, véhicules autonomes, etc.) permettent d'automatiser les tâches physiques et répétitives avec efficacité. Ils favorisent une amélioration de la sécurité, la précision, et la productivité, tout en réduisant les erreurs humaines dans les environnements interconnectés et complexes.	(Tantawi et al., 2019), (Soori et al., 2024), (Ribeiro et al., 2021), (Goel & Gupta, 2020).
Réalité augmentée (RA)	La RA est une technologie qui permet de superposer des éléments virtuels (données, images, sons) à l'environnement réel, à travers un écran, en temps réel, des lunettes intelligentes ou un smartphone. Cette dernière permet de mieux enrichir la perception du monde physique par des informations numériques interactives afin de créer une expérience immersive sans pour autant remplacer la réalité.	(Arnaldi et al., 2018), (Arena et al., 2022), (Fraga-Lamas et al., 2018).

Tableau 1.4 Technologies clés de l'Industrie 4.0 (suite)

Technologie	Concept	Références
Fabrication additive	La fabrication additive (impression 3D) représente un procédé de production qui permet de créer un objet en ajoutant de la matière en couches à partir d'un modèle numérique. Elle permet de produire des pièces complexes, personnalisées et optimisées avec moins de déchets.	(Wong & Hernandez, 2012), (Dilberoglu et al., 2017), (Abdulhameed et al., 2019).
Jumeaux numériques	Les jumeaux numériques sont des répliques virtuelles d'objets, de processus réels ou de systèmes qui sont utilisées afin d'analyser, simuler et optimiser leur fonctionnement en temps réel.	(Cinar et al., 2019), (Julien & Martin, 2020), (Pires et al., 2019).

En explorant l'Industrie 4.0, nous avons examiné l'impact des nouvelles technologies sur le secteur industriel. Il est désormais essentiel d'examiner l'état de la SST dans le cadre de l'Industrie 4.0.

### 1.1.3. Santé et sécurité du travail

Cette section commence par exposer les principes de base de la SST, avant de retracer son évolution au fil des révolutions industrielles. Elle met en évidence les transformations apportées par chaque étape du développement industriel, tout en soulignant les limites des recherches actuelles sur l'intégration de la SST dans le contexte de l'Industrie 4.0. Cette analyse permet de mieux appréhender les défis particuliers associés à l'application de la SST dans un environnement où les technologies émergentes et la transformation numérique redéfinissent les milieux de travail et les pratiques de gestion des risques.

#### a) Définitions et concept

Environ 2,3 millions de décès dans le monde ont été causés par les accidents dans les milieux de travail en 2014. Parmi ces décès, près de 350 000 étaient dus à des accidents, tandis que le reste était attribuable à des maladies professionnelles (Kaassis & Badri, 2018).

En 2019, 2,9 millions de décès ont été attribués au travail dans le monde, dont 2,58 millions dus à des maladies professionnelles et 320 000 à des accidents du travail. Les maladies professionnelles à longue période de latence sont en augmentation, tandis que le nombre

d'accidents du travail a diminué. Le fardeau des maladies et des blessures liées au travail a augmenté de 26 %, passant de 2,3 millions de décès annuels en 2014 à 2,9 millions en 2019 (Takala et al., 2024).

La SST constitue globalement une discipline scientifique encore en développement, comme le montrent les données relatives aux accidents de travail et aux maladies professionnelles, ainsi que l'accès restreint à cette expertise à l'international (Moyo et al., 2015). La SST peut ainsi être perçue comme une priorité visant à préserver et à promouvoir le plus haut niveau de bien-être mental, physique et social des travailleurs dans diverses professions (Jilcha & Kitaw, 2017).

La SST reste un concept pluridisciplinaire dédié à la promotion de la santé, de la sécurité et du bien-être des travailleurs. Elle vise à identifier, évaluer et gérer les risques, qu'ils soient internes ou externes, susceptibles de porter atteinte à la santé, à la sécurité et au bien-être des employés. De plus, elle considère les effets que ces risques peuvent engendrer sur l'environnement de travail (Thatshayini & Rajini, 2018). La SST met l'accent sur les réformes institutionnelles tout en renforçant l'adoption des pratiques de SST (Malinda & Soediantono, 2022).

La SST est une discipline vaste qui englobe plusieurs domaines spécialisés, notamment la promotion et le maintien des plus hauts niveaux de bien-être mental, physique et social des travailleurs dans divers métiers. Elle a pour objectif de préserver les travailleurs des dangers professionnels préjudiciables à leur santé, d'anticiper les impacts négatifs des conditions de travail sur leur bien-être, de garantir que l'environnement de travail réponde à leurs exigences physiques et psychologiques, tout en adaptant les postes de travail en conséquence (Shahbaz & Sajjad, 2021).

Les systèmes de gestion de la SST intègrent l'évaluation, la planification des actions de gestion organisationnelle, ainsi que la consultation et les éléments particuliers des programmes. Ils doivent opérer de manière intégrée, tout en développant des stratégies visant à améliorer les performances (da Silva & Amaral, 2019).

Ces dernières années, plusieurs normes ont été développées pour promouvoir la gestion des risques de SST, afin d'assurer la pérennité des organisations et la sécurité des employés. Parmi ces normes, nous trouvons la CA/CSA-Z1000, l'ISO 31000, et l'OHSAS 18001, entre autres (Kaassis & Badri, 2018).

La SST constitue une branche scientifique centrée sur la gestion et le contrôle organisationnel visant à prévenir et à protéger les employés des maladies professionnelles et des accidents. Les

efforts déployés au niveau organisationnel se traduisent par des réglementations visant à garantir une protection optimale et une prévention efficace.

### **b) Intégration de la SST dans l'évolution industrielle**

Pour appréhender l'évolution des entreprises modernes vers une SST performante, il est essentiel de débuter par une analyse historique de la SST dans le secteur industriel, en suivant son évolution depuis l'Industrie 1.0 jusqu'à l'Industrie 4.0.

#### **- SST à l'ère de l'Industrie 1.0**

La première révolution industrielle a reconnu un manque confirmé au niveau de prévention en matière de SST à cause de plusieurs facteurs. Le Tableau 1.5 résume les caractéristiques des éléments du travail dans l'Industrie 1.0, définissant ainsi la SST à l'ère de l'Industrie 1.0 (SST 1.0).

Tableau 1.5 SST à l'ère de l'Industrie 1.0 (Ávila-Gutiérrez et al., 2022)

<b>Éléments de travail dans l'Industrie 1.0</b>	<b>Description</b>
Travailleur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Manque de formation formelle à la tâche</li> <li>- Pas d'informations sur les risques et la tâche</li> </ul>
Machines et environnement	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de mesures en matière de sécurité</li> <li>- Environnement malsain</li> <li>- Non adaptés au travailleur</li> <li>- Moteur à vapeur et moteur hydraulique</li> <li>- Puissance hydraulique</li> </ul>
Travail	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Primitif</li> <li>- Manuel</li> <li>- Non standardisées</li> </ul>
Produit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Non hygiénique</li> <li>- Non ergonomique</li> <li>- Non optimisé</li> <li>- Non sécurisé</li> </ul>

Tableau 1.5 SST à l'ère de l'Industrie 1.0 (Ávila-Gutiérrez et al., 2022) (suite)

Éléments de travail dans l'Industrie 1.0	Description
Organisation/ règles	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Passage de l'atelier à l'usine</li> <li>- Transformation d'un travail artisanal en un travail industriel ou répétitif</li> <li>- Organisation informelle et naissante</li> <li>- Pas de culture préventive dans la communauté</li> </ul>
Risques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Risques physiques.</li> <li>- Risques hygiéniques</li> <li>- Risques ergonomiques</li> </ul>
SST 1.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La prévention est absente dans les usines et dans les autres secteurs, comme l'agriculture ou l'exploitation minière</li> <li>- Le travail est une source de défaillances métaboliques</li> <li>- Aucune réglementation spécifique n'est en place</li> <li>- Il n'existe pas d'action systématique ou normative en SST</li> </ul>

#### - SST à l'ère de l'Industrie 2.0

La deuxième révolution industrielle a reconnu aussi un manque relatif au niveau de prévention en matière de SST à cause de divers facteurs. Le Tableau 1.6 résume les caractéristiques des éléments du travail dans l'Industrie 2.0, définissant ainsi la SST à l'ère de l'Industrie 2.0 (SST 2.0).

Tableau 1.6 SST à l'ère de l'Industrie 2.0 (Ávila-Gutiérrez et al., 2022)

<b>Éléments de travail dans l'Industrie 2.0</b>	<b>Description</b>
Travailleur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formation de base en matière de SST</li> </ul>
Machines et environnement	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Machines électriques</li> <li>- Automatisme électrique à logique câblée</li> <li>- Personnalisation par l'utilisateur</li> <li>- Taylorisme</li> <li>- Peu hygiénique et peu sûr</li> </ul>
Travail	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ligne d'assemblage</li> <li>- Le taylorisme adapte le travail au travailleur</li> <li>- Production de masse ou fordisme</li> </ul>
Produit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Optimisation du produit et des procédés</li> <li>- Considération des éléments liés à la sécurité physique</li> </ul>
Organisation/ règles	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Division du travail et travail par spécialisation</li> <li>- Culture préventive naissante</li> <li>- Flexibilité du travail</li> <li>- Organisation scientifique du travail (Taylor)</li> <li>- Organisation administrative, structures hiérarchiques (Fayol)</li> </ul>
Risques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Risques physiques</li> <li>- Risques ergonomiques</li> <li>- Risques hygiéniques</li> </ul>
SST 2.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La prévention privilégie la sécurité et l'hygiène des produits ainsi que des procédés de fabrication</li> <li>- Les normes se concentrent sur la sécurité du travail et l'hygiène dans le milieu industriel</li> <li>- Le travail contribue à l'augmentation des défaillances métaboliques</li> </ul>

### - SST à l'ère de l'Industrie 3.0

La troisième révolution industrielle se caractérise par l'automatisation et l'intégration des TIC dans les processus pour une numérisation des processus et des produits. Le Tableau 1.7 résume les caractéristiques des éléments du travail dans l'Industrie 3.0, définissant ainsi la SST à l'ère de l'Industrie 3.0 (SST 3.0).

Tableau 1.7 SST à l'ère de l'Industrie 3.0 (Ávila-Gutiérrez et al., 2022)

<b>Éléments de travail dans l'Industrie 3.0</b>	<b>Description</b>
Travailleur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Information et formation sur le milieu de travail</li> <li>- Formation professionnelle des travailleurs</li> <li>- Formation à la SST dans les études de formation professionnelle</li> </ul>
Machines et environnement	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesures de SST et d'hygiène environnementale</li> <li>- Numérisation des outils</li> <li>- Informatisation des processus</li> <li>- Automatisation et informatisation des tâches</li> </ul>
Travail	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Automatisation et flexibilité</li> <li>- Des tâches numériques</li> <li>- Formalisation à la tâche</li> <li>- Travail de qualité</li> </ul>
Produit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Optimisation du produit</li> <li>- Des produits sécurisés</li> <li>- Des produits ergonomiques</li> </ul>
Organisation/ règles	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Macro-ergonomie</li> <li>- Culture préventive dans les entreprises</li> <li>- Systèmes organisationnels hiérarchiques, hétéro-hiéroglyphiques et systémiques</li> <li>- Système sociotechnique professionnel</li> <li>- Intégration des TIC</li> <li>- Travail d'équipe</li> </ul>

Tableau 1.7 SST à l'ère de l'Industrie 3.0 (Ávila-Gutiérrez et al., 2022) (suite)

<b>Éléments de travail dans l'Industrie 3.0</b>	<b>Description</b>
Risques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Risques classiques</li> <li>- Risques spécifiques des nouvelles technologies majoritairement dans le domaine électrique et nucléaire</li> </ul>
SST 3.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les approches de prévention et les services associés sont gérés comme une entité organisationnelle</li> <li>- Gestion des stratégies de prévention via le système de prévention des risques professionnels</li> <li>- Réglementation spécifique pour la prévention des risques professionnels</li> <li>- Prévention axée sur la sécurité des produits et des procédés.</li> <li>- Mondialisation de la production et internationalisation des vulnérabilités métaboliques</li> <li>- Spécialisation dans les domaines de la sécurité du travail, de l'ergonomie, de l'hygiène et de la psychosociologie</li> <li>- Sensibilisation accrue aux impacts environnementaux</li> </ul>

#### - SST à l'ère de l'Industrie 4.0

La quatrième révolution industrielle se caractérise par la transformation numérique des organisations grâce à la connectivité machine-machine (M2M), à des outils numériques tels que les données massives, l'IoT, l'informatique en nuage, les systèmes intelligents, la simulation et la virtualisation, les robots humains intelligents, l'intégration des innovations technologiques, la nouvelle organisation du travail, la mondialisation, l'intégration du travail et de la vie personnelle et la volatilité du changement (Dalenogare et al., 2018; Liao et al., 2017; Syam & Sharma, 2018). Le Tableau 1.8 résume les caractéristiques des éléments du travail dans l'Industrie 4.0, définissant ainsi la SST à l'ère de l'Industrie 4.0 (SST 4.0).

Tableau 1.8 SST à l'ère de l'Industrie 4.0 (Ávila-Gutiérrez et al., 2022)

<b>Éléments de travail dans l'Industrie 4.0</b>	<b>Description</b>
Travailleur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formation à la SST</li> <li>- Conscience écologique</li> <li>- Système cyber-physique</li> <li>- Exosquelettes sensoriels et moteurs</li> <li>- Co-robots</li> <li>- Opérateur 4.0</li> </ul>
Machines et environnement	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sécurité, hygiène et ergonomie connectées et intelligentes</li> <li>- Plateformes numériques</li> <li>- Interfaces opérationnelles</li> <li>- Simulation</li> <li>- Jumelage cyber-physique</li> <li>- Interactions avec l'environnement</li> </ul>
Travail	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Créatif</li> <li>- Taylorisme numérique</li> <li>- Écologique</li> <li>- Durable</li> <li>- Virtuel</li> <li>- Cognitif</li> <li>- Affectif</li> <li>- Intelligence émotionnelle</li> <li>- Télétravail</li> <li>- Collaboratif</li> </ul>
Produit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Connecté et intelligent</li> <li>- Durable</li> <li>- Ergo-écologique</li> <li>- Virtuel</li> </ul>

Tableau 1.8 SST à l'ère de l'Industrie 4.0 (Ávila-Gutiérrez et al., 2022) (suite)

<b>Éléments de travail dans l'Industrie 4.0</b>	<b>Description</b>
Organisation / règles	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transformation numérique et système cyber-physique</li> <li>- Taylorisme numérique</li> <li>- De l'analogique au numérique</li> <li>- Détachement du milieu de travail</li> <li>- Innovations perturbatrices</li> <li>- Organisation connectée, intelligente et virtuelle</li> <li>- Organisation distribuée et virtuelle</li> <li>- Culture de la durabilité et de la prévention</li> <li>- Nouvelles méthodes d'attribution des contrats</li> <li>- Du linéaire au circulaire</li> <li>- Du tangible à l'intangible</li> <li>- Économie de partage</li> <li>- Le travail dans l'environnement familial</li> <li>- Environnement incertain, complexe et volatile</li> </ul>
Risques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le risque est défini comme une perte de valeur dans les domaines social, économique et environnemental</li> <li>- Le risque est considéré comme une propriété émergente des systèmes complexes</li> <li>- Les technologies avancées génèrent de nouveaux risques ainsi que des risques émergents</li> <li>- Les plateformes technologiques, les outils numériques de l'Industrie 4.0 et les nouvelles méthodes de travail futur entraînent l'apparition de risques nouveaux et émergents</li> <li>- Les caractéristiques de la main-d'œuvre incluent des aspects tels que la culture, la formation et la motivation</li> </ul>

Tableau 1.8 SST à l'ère de l'Industrie 4.0 (Ávila-Gutiérrez et al., 2022) (suite)

<b>Éléments de travail dans l'Industrie 4.0</b>	<b>Description</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le risque et le danger sont perçus comme des propriétés émergentes des systèmes complexes dans les environnements sociotechniques cyber-physiques</li> <li>- Une approche proactive dans la recherche sur les risques technologiques</li> </ul>
SST 4.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La science de la sécurité s'appuie sur les principes de la complexité pour une approche intégrée couvrant les dimensions sociales, économiques et environnementales</li> <li>- Une approche préventive en SST se concentre sur l'écologie, la psychosociologie et l'ergonomie, intégrée aux politiques de santé publique</li> <li>- La SST est intégrée dans la durabilité sociale, qui constitue l'un des trois piliers de la durabilité</li> <li>- La gestion de la SST utilise des systèmes cyber-physiques multiniveaux, écologiques, et des technologies génériques.</li> <li>- Les environnements intelligents et les processus connectés renforcent la prévention des risques professionnels</li> <li>- Une amélioration continue de la SST est possible grâce aux connaissances avancées et aux outils numériques</li> <li>- L'anthropo-technologie et l'ethno-technologie sont utilisées pour concevoir des technologies favorisant la sécurité au sein des communautés</li> <li>- Les systèmes intelligents permettent un suivi en temps réel de la SST via des indicateurs systémiques</li> <li>- La numérisation et les modèles d'économie circulaire contribuent à réduire la fracture métabolique de l'Industrie 4.0</li> </ul>

Selon Ávila-Gutiérrez et al. (2022), l'analyse de l'évolution historique du travail est cruciale pour appréhender les transformations futures du monde du travail. Ces transformations se caractérisent par l'émergence des nouvelles technologies, les évolutions dans l'organisation et les modes de travail, l'usage de nouveaux substances ou matériaux, le vieillissement croissant de la main-d'œuvre, l'intégration des travailleurs migrants, ainsi que les facteurs psychosociaux comme risques émergents. Il est crucial que ces problématiques soient prises en compte par les systèmes d'information, la recherche et le transfert des résultats en matière de SST, afin de soutenir les entreprises, les régions et les pays dans leur adaptation continue aux changements.

### c) Limites des études actuelles sur l'intégration de la SST dans l'Industrie 4.0

Malgré l'effervescence actuelle pour la publication scientifique autour de l'Industrie 4.0, le nombre d'articles qui traitent spécifiquement l'intégration de la SST demeure relativement restreint. La majorité des recherches se focalisent principalement sur les technologies novatrices qui déclenchent cette transformation, négligeant ainsi les effets sur la SST. Les études relatives à l'intégration de la SST dans le contexte de l'Industrie 4.0 sont rarement citées (Badri et al., 2018).

Le nombre de publications scientifiques qui associent les concepts de l'Industrie 4.0 et de SST est encore relativement limité. De surcroît, les recherches sur l'intégration de la SST dans le contexte de l'Industrie 4.0 sont également peu fréquentes (Badri et al., 2018).

Le Tableau 1.9 présente le nombre de publications scientifiques entre 2010 et 2018 selon différentes thématiques en lien avec la complexité, l'Industrie 4.0, les risques, la sécurité, etc.

Tableau 1.9 Nombre de publications scientifique par thème (Brocal, González, et al., 2019)

<b>Thématique</b>	<b>Nombre total de publications entre 2010 et 2018</b>
Complexité	555446
Industrie 4.0	3539
Complexité et Industrie 4.0	196
Risques	2398401
Gestion des risques	61013
Risques et Industrie 4.0	156
Risques émergents	695
Gestion des risques émergents	154
Santé	1816611
Sécurité et l'industrie	96624
Sécurité et Industrie 4.0	173
Sécurité du travail	15046
Sécurité du travail et Industrie 4.0	16

Les publications traitant de la complexité dans le contexte de l’Industrie 4.0 demeurent relativement rares. Les premières recherches scientifiques sur ce thème ont été publiées en 2012. Néanmoins, le concept d’Industrie 4.0 attire un intérêt de plus en plus marqué. Bien que le nombre de publications scientifiques sur le thème de l’Industrie 4.0 soit considérable, celles qui abordent la thématique du risque en lien avec l’Industrie 4.0 restent très restreintes (Brocal, González, et al., 2019).

Selon Brocal, González, et al. (2019), il est primordial de mener davantage les recherches pour permettre une transition harmonieuse vers l’Industrie 4.0, car les études sur les cadres de SST liés à cette nouvelle ère technologique et leurs applications sont encore limitées. Le déficit de recherches scientifiques met en évidence la nécessité d’effectuer des enquêtes qualitatives et quantitatives pour construire une infrastructure de SST solide, essentielle pour assurer une adoption sécurisée de l’Industrie 4.0.

#### **1.1.4. Systèmes complexes et transformation numérique**

Cette section explore l’interconnexion entre les systèmes complexes et la transformation numérique. Elle met en évidence leur interdépendance croissante dans les environnements

industriels modernes. Elle examine d'abord l'impact de la transformation numérique sur ces systèmes, avant d'aborder leur importance, leurs différentes typologies et des exemples concrets illustrant leur fonctionnement. Enfin, une attention particulière est portée aux risques inhérents à l'intégration des technologies numériques dans ces systèmes.

### **a) Transformation numérique des systèmes complexes**

La numérisation constitue aujourd'hui un enjeu stratégique crucial pour les entreprises, dépassant les simples avancées technologiques pour impliquer une transformation profonde des modes de fonctionnement et des orientations stratégiques. En intégrant des technologies avancées, telles que l'IA, les données massives et l'IoT, les organisations peuvent non seulement améliorer leurs processus internes et renforcer leur efficacité, mais aussi prévoir les évolutions du marché, adapter leurs offres aux besoins spécifiques des clients et concevoir des solutions novatrices pour rester compétitives dans un contexte en perpétuelle mutation (Ebert & Duarte, 2018).

Toutefois, cette transition dépasse la simple mise en œuvre de nouvelles technologies. Elle exige une refonte complète des schémas organisationnels, une gestion proactive du changement et un investissement soutenu dans le développement des compétences des employés. Cela inclut la mise en œuvre de programmes de formation continue, la valorisation d'une culture axée sur l'innovation et le soutien aux équipes dans l'adoption des outils numériques, tout en alignant ces initiatives avec les grandes priorités stratégiques de l'entreprise (Vial, 2021).

Lorsque ces évolutions sont conduites avec une vision claire et une anticipation adéquate, les systèmes complexes acquièrent la capacité de mieux gérer l'incertitude, de s'adapter rapidement aux changements du marché et de renforcer leur résilience face aux perturbations. Ils adoptent une structure plus agile et interconnectée, facilitant des décisions éclairées et des interactions fluides entre les parties prenantes, tout en assurant une création de valeur pérenne et des impacts positifs à long terme (Lakemond et al., 2021).

Le Tableau 1.10 ci-dessous compare les caractéristiques des systèmes complexes traditionnels et ceux en pleine transformation numérique. Il met en évidence les différences en termes de concepts, de technologies utilisées, d'impacts sur les modèles d'affaires et de gestion des risques. Cette comparaison permet de mieux comprendre les enjeux et les défis liés à l'intégration des technologies numériques dans ces systèmes, en soulignant leur complexité croissante et leur besoin d'adaptabilité.

Tableau 1.10 Systèmes complexes et transformation numérique

Critère	Système complexe	Système complexe en pleine transformation numérique
Concept	Réseaux d'éléments interconnectés dont les interactions non linéaires sont souvent imprévisibles	Réseaux dynamiques de composants interconnectés exploitant les technologies numériques pour transformer divers processus et secteurs
Portée	Peut être utilisé dans divers domaines, y compris les systèmes sociaux, biologiques et technologiques	Étendue et multisectorielle : couvre des secteurs tels que les finances, la santé, la logistique, l'éducation et bien d'autres
Technologies clés	Pas précisément définies ; les technologies peuvent varier selon les systèmes étudiés	Données massives, IoT, IA, informatique en nuage, blockchain, cybersécurité, RV
Caractéristiques principales	Interactions fréquemment imprévisibles et complexes, émergence de comportements inattendus et rétroactions	Complexité des interactions, interconnexion et intégration des systèmes, gestion des risques et adaptabilité en temps réel
Objectifs	Appréhender et gérer la complexité des comportements et des interactions au sein des systèmes	Moderniser et optimiser les processus et les modèles d'affaires dans divers secteurs tout en intégrant les technologies numériques avancées
Applications	Études des réseaux sociaux, écosystèmes, systèmes biologiques, et systèmes économiques	Finance numérique, gestion de la chaîne d'approvisionnement, santé connectée, système éducatif avancé, services à la clientèle automatisés

Tableau 1.10 Systèmes complexes et transformation numérique (suite)

Critère	Système complexe	Système complexe en pleine transformation numérique
Focus technologique	Généralement non technologique ; se focalise sur la gestion des systèmes	Étendu et général : englobe toutes les technologies numériques utilisées dans divers secteurs
Impact sur les modèles d'affaires	Influe sur la gestion de la complexité et la compréhension des systèmes, avec un effet qui diffère selon le secteur	Transformation des modèles d'affaires grâce à la numérisation et à l'optimisation des processus dans différents domaines
Complexité	Complexité due aux comportements émergents et aux interactions non linéaires	Complexité élevée en raison des multiples interactions entre processus, technologies et acteurs à travers divers secteurs
Gouvernance et régulation	Peut engendrer des défis de gouvernance à cause de son imprévisibilité et sa complexité	Les régulations varient en fonction des secteurs et peuvent inclure la cybersécurité, la protection des données, ainsi que des normes de conformité propres à chaque entreprise
Gestion des risques	Gestion des risques liée à la complexité des interactions	Gestion des risques associés aux technologies, à la conformité, à la cybersécurité, et aux effets sur les processus opérationnels
Exemples d'implémentation	Modèles écologiques, systèmes économiques internationaux, et des réseaux sociaux	Plateformes d'analyse de données, systèmes de gestion intégrée, services financiers, et applications de télémédecine utilisant la blockchain

Tableau 1.10 Systèmes complexes et transformation numérique (suite)

Critère	Système complexe	Système complexe en pleine transformation numérique
Interdépendance des composants	L'ensemble des composants sont interconnectés de manière complexe, ce qui peut entraîner des effets rétroactifs inattendus	Les processus et les composants technologiques sont interconnectés et doivent agir de manière coordonnée pour en tirer le maximum d'avantages
Adaptabilité et flexibilité	Grande flexibilité pour s'ajuster aux environnements évolutifs et gestion des comportements émergents	Excellente flexibilité pour s'ajuster aux environnements changeants et aux évolutions rapides des technologies

### b) Importance des systèmes complexes

L'application de modèles mathématiques, de données empiriques et de simulations informatiques aide à mieux saisir le comportement des systèmes complexes et à prédire leurs réactions dans différents contextes. L'analyse des systèmes complexes nécessite l'interdisciplinarité, faisant appel à des domaines variés, tels que les mathématiques, l'informatique, la physique, etc. (Martínez-García & Hernández-Lemus, 2013).

Pour résoudre divers problèmes et répondre à des besoins que les systèmes simples ne peuvent pas satisfaire, il est nécessaire de recourir à des systèmes complexes. Plusieurs raisons justifient ce besoin de systèmes complexes, parmi lesquelles nous pouvons citer (Božić, 2023) :

- Les systèmes complexes sont souvent essentiels pour traiter, stocker et analyser de grandes quantités de données, comme c'est le cas dans les villes intelligentes, les systèmes financiers et les systèmes de santé.
- Les systèmes complexes sont généralement requis pour orchestrer des processus complexes, tels que les systèmes de transport, les systèmes de production et les systèmes énergétiques.

- Les systèmes complexes sont fréquemment utilisés pour traiter des défis complexes, notamment les simulations scientifiques, le suivi environnemental et les prévisions météorologiques.
- Les systèmes complexes sont fréquemment essentiels pour répondre aux exigences de différentes parties prenantes, comme c'est le cas dans les domaines politiques, sociaux et éducatifs.
- Les systèmes complexes sont fréquemment cruciaux pour s'ajuster aux circonstances en évolution, comme c'est le cas dans les systèmes militaires, les dispositifs de gestion des urgences et les mécanismes de réponse aux catastrophes.
- Les systèmes complexes sont fréquemment déterminants pour accroître l'efficacité et la performance, surtout dans les systèmes de santé, les dispositifs de gestion de la chaîne d'approvisionnement et les systèmes financiers.
- Les systèmes complexes sont souvent indispensables pour améliorer l'expérience des utilisateurs, comme c'est le cas dans les systèmes de jeux, les plateformes de divertissement et les dispositifs de RV.

L'étude des systèmes complexes est interdisciplinaire, impliquant divers domaines, tels que les mathématiques, l'informatique, la physique et la biologie. Nous distinguons plusieurs concepts et méthodes essentiels pour analyser les systèmes complexes, en particulier ceux en transformation numérique (Božić, 2023) :

- L'analyse des systèmes en tant que réseaux de nœuds interconnectés et l'examen de leur structure et dynamique.
- L'étude de l'évolution temporelle des systèmes, en mettant l'accent sur leur stabilité et leur dynamisme.
- La simulation des systèmes complexes à l'aide de modèles informatiques.
- L'application des techniques et des algorithmes d'apprentissage automatique pour extraire des connaissances à partir des données et faire des prévisions selon les besoins.
- Le développement des algorithmes et des systèmes capables d'accomplir des tâches nécessitant traditionnellement une intelligence humaine.

Les systèmes complexes sont clairement indispensables pour identifier les défis et proposer des opportunités dans un environnement automatisé et interconnecté, tout en répondant aux besoins de la communauté dans divers domaines (Božić, 2023).

### c) Types des systèmes complexes

Parmi les types des systèmes complexes, nous pouvons citer celles énumérées dans la Figure 1.2 (Božić, 2023) :

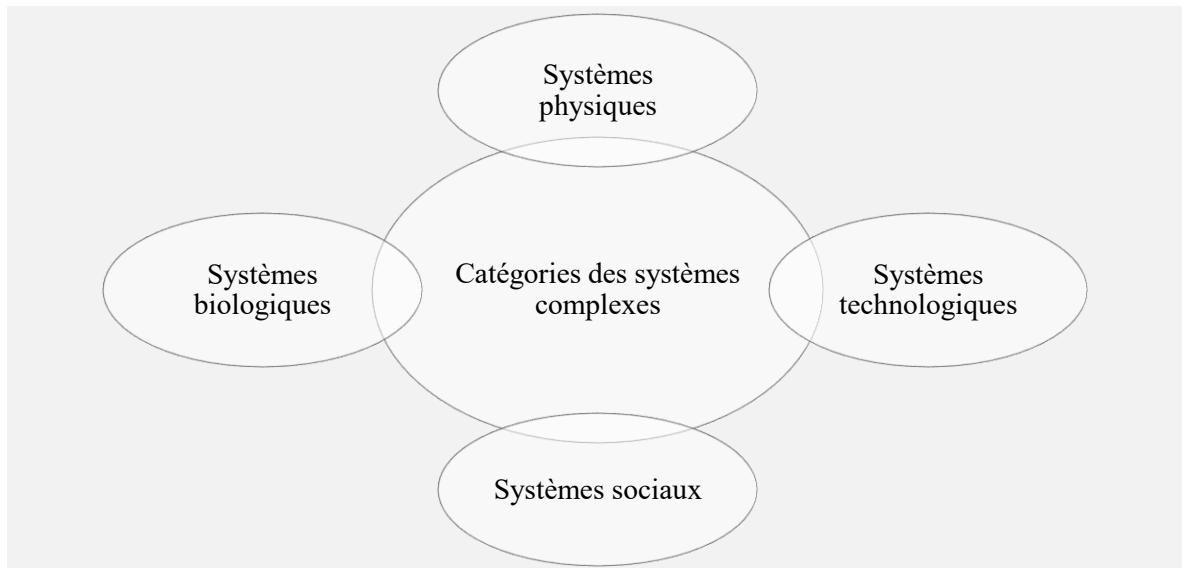


Figure 1.2 Types des systèmes complexes

- Systèmes physiques : ces systèmes incluent les systèmes climatiques, les systèmes de dynamique des fluides et les systèmes météorologiques qui comprennent plusieurs processus physiques en interaction.
- Systèmes biologiques : ces systèmes englobent les organismes, les populations et les écosystèmes composés d'un grand nombre d'espèces et d'individus interagissant entre eux.
- Systèmes sociaux : ces systèmes incluent les marchés, les organisations et les sociétés qui sont constitués d'un nombre important d'organisations et d'individus en interaction.
- Systèmes technologiques : ces systèmes incluent l'ensemble des réseaux de transport, des réseaux électriques, des réseaux de communication qui sont constitués d'un nombre important des éléments technologiques en interaction.

### d) Exemples des systèmes complexes

Il existe plusieurs exemples des systèmes complexes. Parmi eux, nous pouvons citer celles inscrites dans la Figure 1.3 (Božić, 2023) :

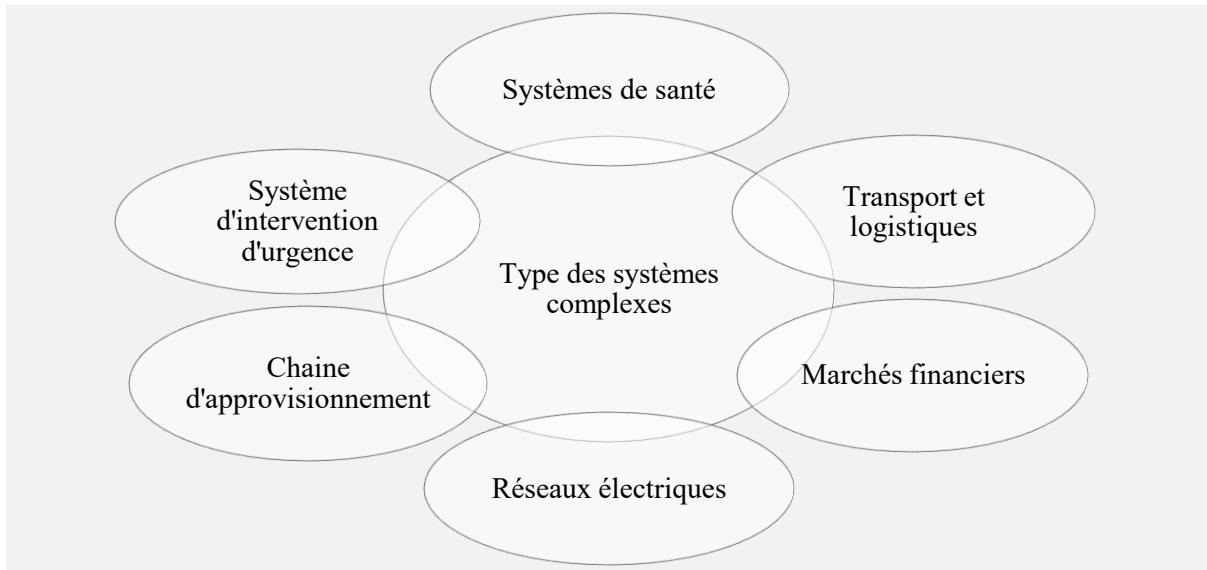


Figure 1.3 Exemples des systèmes complexes

- Systèmes de santé : ces systèmes sont en réalité des structures complexes qui assurent la coordination des soins entre les patients, les professionnels de santé, les institutions gouvernementales et les compagnies d’assurance.
- Systèmes d’intervention d’urgence : ces systèmes sont classés comme complexes en raison de leur capacité à coordonner diverses ressources et agences, telles que la police, les pompiers et les services médicaux, pour gérer les situations d’urgence.
- Chaîne d’approvisionnement : la gestion des flux dans la chaîne d’approvisionnement constitue un système complexe qui facilite l’optimisation et la coordination des mouvements de biens et de services entre les producteurs, les fournisseurs, les distributeurs et les clients.
- Transport et logistique : les divers réseaux de transport, incluant les infrastructures ferroviaires, aériennes et routières, forment des systèmes complexes qui facilitent la coordination des moyens de transport, des infrastructures et des marchandises, entre autres.
- Marchés financiers : les marchés de devises et d’actions sont perçus comme des systèmes complexes qui facilitent les transactions d’achat et de vente de devises et de titres financiers entre les acteurs du marché.
- Réseaux électriques : ces systèmes complexes facilitent la génération, le transport et la distribution de l’électricité aux utilisateurs.

- Réseaux des médias sociaux : ces systèmes complexes permettent aux utilisateurs de créer et de partager du contenu.

Il s'agit juste de quelques exemples des systèmes complexes, mais il en existe de nombreux autres, comme les systèmes météorologiques, les écosystèmes ou les processus de fabrication. Les systèmes complexes se rencontrent dans divers domaines. Ils se distinguent généralement par la présence de nombreux composants ou éléments interdépendants en interaction, ce qui engendre un besoin de gestion et de contrôle (Božić, 2023).

#### **e) Risques associés à la transformation numérique des systèmes complexes**

Les systèmes complexes engendrent plusieurs risques, parmi lesquels nous pouvons ainsi identifier (Božić, 2023) :

- Les défaillances dues aux interactions complexes et aux interconnexions entre les composants.
- Les cyberattaques peuvent menacer la confidentialité et la sécurité des données au sein des systèmes complexes.
- La dépendance technologique, qui peut réduire la résilience en cas des cyberattaques ou des pannes système.
- Les erreurs humaines, souvent exacerbées par la complexité des systèmes.
- Les risques pour la vie privée, notamment concernant les informations sensibles des individus.
- Les exigences légales et réglementaires, qui varient d'un pays à l'autre et évoluent dans le temps.
- Les problèmes de qualité des données, en particulier celles issues de grandes quantités provenant de sources diverses.
- L'obsolescence technique, résultant de l'évolution technologique et de l'absence de mises à jour régulières.

L'évolution des systèmes complexes, leur transformation numérique ont un impact significatif sur la SST. Toutefois, ces dynamiques varient selon les contextes géographiques et industriels. Ainsi, il est essentiel d'examiner les différences régionales en matière de maturité numérique et de gestion de la SST afin de mieux comprendre les défis et opportunités spécifiques aux entreprises québécoises, européennes et nord-africaines.

L’analyse de la SST dans le contexte de l’Industrie 4.0 se situe à l’échelle mondiale, où les entreprises des régions du Québec, de l’Europe et de l’Afrique du Nord adaptent leurs pratiques face à des réglementations et des défis technologiques diversifiés. La section suivante permet de mieux saisir l’impact de la transformation numérique sur la SST dans ces différentes régions.

### **1.1.5. Entreprises québécoises, européennes et nord-africaines : analyse régionale comparée**

Cette section se penche sur les pratiques de SST au sein des entreprises, en évaluant leur maturité numérique respective. Elle débute par une analyse du niveau de maturité numérique des entreprises sélectionnées, en examinant l’intégration des technologies avancées et leur influence sur la gestion des risques. Par la suite, la section se focalise sur l’état de la SST dans ces entreprises, en prenant en compte les spécificités régionales et les défis particuliers liés à l’adoption de la SST, surtout dans le contexte des évolutions numériques actuelles.

#### **a) Maturité numérique**

L’avancée des technologies a fait de la numérisation un élément central de notre quotidien. Cette transformation a provoqué des changements majeurs dans le fonctionnement des entreprises (Schwer et al., 2018). Aujourd’hui, la transformation numérique représente l’une des évolutions technologiques et commerciales les plus prometteuses pour les entreprises, souvent appelée « Industrie 4.0 » (Vial, 2021).

La transformation numérique ne se limite pas simplement à l’intégration de technologies numériques et à leur utilisation optimale (Flott et al., 2016). Un des principaux défis pour les organisations dans ce processus est d’évaluer leur niveau actuel de maturité numérique, ce qui leur permet de mieux comprendre leurs compétences clés (Blatz et al., 2018).

Le concept de maturité numérique, qui a émergé dans le secteur public pour améliorer l’efficacité de ses services, a pour objectif principal de résoudre cette problématique (Flott et al., 2016). Avant de débuter leur transformation numérique, les organisations doivent d’abord identifier les points de départ et les modalités de ce processus. Cela implique d’évaluer leur niveau actuel de maturité numérique, afin de mieux comprendre leurs capacités et de concevoir des scénarios d’action possibles (Blatz et al., 2018).

De manière générale, une stratégie numérique regroupe les objectifs de numérisation d’une entreprise. Elle englobe l’intégration de technologies numériques dans les processus de

production, dans les produits ou services offerts, ainsi que dans la réinvention ou la création de nouveaux modèles d'affaires basés sur ces technologies (Schallmo et al., 2018). La transition d'une entreprise vers une organisation numérique commence par la définition d'une stratégie numérique bien structurée, alignée avec la stratégie globale de l'entreprise (Ochoa, 2016).

Cela implique que les organisations doivent aligner leur structure, le développement de leurs compétences, leurs mécanismes de financement et leurs indicateurs de performance avec la stratégie numérique qu'elles ont choisie. Ainsi, le succès de la stratégie numérique ne repose pas uniquement sur les choix technologiques, mais aussi sur la capacité des organisations à investir dans des compétences numériques adaptées, en harmonie avec la stratégie numérique et la stratégie organisationnelle globale (Catlin et al., 2015).

### **b) Maturité numérique dans les entreprises québécoises, européennes et nord-africaines**

L'évaluation de la maturité numérique au sein de diverses entreprises, comme les entreprises québécoises, européennes et nord-africaines, offre une perspective importante sur les disparités de l'intégration et de l'adaptation des différentes technologies au sein des entreprises.

#### **- Maturité numérique dans les entreprises québécoises**

Au Québec, les organisations manifestent un intérêt croissant pour la digitalisation grâce à l'encouragement et des initiatives gouvernementales. Le degré de la maturité numérique varie considérablement en fonction de l'entreprise du domaine d'activité. En fait, les grandes entreprises adoptent souvent des technologies sophistiquées, notamment l'IA, la robotisation ou l'informatique en nuage. En revanche, les petites et les moyennes entreprises (PME) sont confrontées à des restrictions budgétaires et à un accès limité à des spécialistes du numérique. Ces PME privilégient à des outils plus simples et accessibles, comme la dématérialisation des processus ou l'emploi des progiciels de gestion intégrée. Néanmoins, des défis persistent surtout en ce qui concerne l'établissement d'une culture numérique et le renforcement des compétences des employés (Bouchard et al., 2022; Caron et al., 2020; Gamache et al., 2019a, 2020). Le Tableau 1.11 résume quelques spécificités des entreprises québécoises en contexte de la maturité numérique.

Tableau 1.11 Maturité numérique dans les entreprises québécoises

Critères	Entreprises québécoises	Références
Infrastructure numérique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les entreprises québécoises sont particulièrement performantes en intégrant de manière efficace les processus numériques dans leurs activités quotidiennes.</li> <li>- Ils sont en pleine croissance et compétitifs, notamment dans des secteurs comme l'IA et l'automatisation.</li> <li>- Il y'a une adoption rapide des technologies émergentes.</li> <li>- L'infrastructure numérique est performante</li> </ul>	(Lomazzi & Lomazzi, 2019), (Gamache, 2019), (Tremblay et al., 2022), (Gamache et al., 2019b).
Culture d'innovation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elle est dynamique, appuyée par des initiatives gouvernementales et favorable à l'émergence de nouvelles entreprises.</li> <li>- Les écosystèmes d'innovation sont renforcés par des incubateurs et des programmes d'accélération</li> <li>- Un effort considérable est déployé pour le développement des compétences numériques, en partenariat avec les institutions éducatives et les entreprises.</li> <li>- Les entreprises québécoises s'engagent régulièrement dans des partenariats internationaux pour échanger des technologies et des compétences.</li> </ul>	(Caron et al., 2020), (Bouchard et al., 2022),

Tableau 1.11 Maturité numérique dans les entreprises québécoises (suite)

Critères	Entreprises québécoises	Références
Réglementations et politiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Des politiques favorisant l'innovation et la cybersécurité, contribuant à créer un environnement numérique sécurisé.</li> <li>- Ils intègrent des pratiques durables dans leurs stratégies numériques, en prenant en considération leur impact environnemental.</li> </ul>	(Mocquet, 2023), (Poulin et al., 2001).

#### - Maturité numérique dans les entreprises européennes

En Europe, les entreprises affichent en général un haut degré de développement numérique dans des pays tels que les nations nordiques et l'Allemagne. Ce développement est dû grâce à des stratégies robustes en matière de l'Industrie 4.0 et à des soutiens financiers bien ciblés. Ainsi, les grandes entreprises européennes se démarquent par une adoption avancée de technologies comme l'IoT, les données massives et la cybersécurité (Balland & Boschma, 2021; Brodny & Tutak, 2021; Demikhov et al., 2023; Ortega-Gras et al., 2021). Les PME sont en pleine évolution, mais ils font face à des défis proches à ceux des entreprises québécoises, tels que un déficit de compétences numériques et des contraintes liées au financement (Bendriss 1 et al., 2014). Dans cette optique, l'Union européenne joue un rôle important tout en favorisant la transition numérique au moyen de programmes tels que le Digital Europe Programme qui visent à harmoniser et à stimuler l'utilisation des technologies émergentes à l'échelle régionale (SZCZEPANSKI, 2019). Le Tableau 1.12 résume quelques spécificités des entreprises européennes en contexte de la maturité numérique.

Tableau 1.12 Maturité numérique dans les entreprises européennes

Critères	Entreprises européennes	Références
Infrastructure numérique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les stratégies numériques adoptées par de nombreuses entreprises varient d'un pays à l'autre, certaines ayant mis en place des plans clairement définis.</li> <li>- L'infrastructure numérique est solide, malgré les différences régionales.</li> <li>- Les investissements en technologie sont importants, en mettant l'accent sur des solutions de pointe, tout en prenant en compte les différences d'intensité des investissements.</li> <li>- Une adoption répandue des technologies émergentes, de nombreuses entreprises mettant en œuvre des solutions innovantes pour se démarquer.</li> </ul>	(Balland & Boschma, 2021), (Brodny & Tutak, 2021), (Daniels et al., 2023).
Culture d'innovation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Une culture de l'innovation bien ancrée, alimentée par des écosystèmes qui favorisent la créativité et l'avancement technologique.</li> <li>- Les grandes villes disposent d'écosystèmes d'innovation de pointe, favorisant l'entrepreneuriat et la recherche.</li> <li>- Une coopération transfrontalière forte permet aux entreprises de collaborer sur des projets numériques innovants.</li> <li>- Un large choix de programmes de formation est offert pour répondre aux besoins du marché du travail, soutenu par des initiatives de l'Union européenne.</li> </ul>	(Tutak & Brodny, 2022), (Daniels et al., 2023).

Tableau 1.12 Maturité numérique dans les entreprises européennes (suite)

Critères	Entreprises européennes	Références
Réglementations et politiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les règles concernant la protection des données sont strictes.</li> <li>- La durabilité prend de plus en plus d'importance, avec des initiatives visant à rendre la transformation numérique plus respectueuse de l'environnement.</li> </ul>	(Demikhov et al., 2023), (Fischer-Hübner et al., 2021), (Dezalay, 2007), (Schepers, 2016).

#### - Maturité numérique dans les entreprises nord-africaines

Dans les pays d'Afrique du Nord, la transformation numérique des entreprises demeure généralement à un stade moins mature, malgré des avancées significatives qui ont été réalisées dans les domaines des services et de l'industrie manufacturière (El Aynaoui et al., 2022; Elkasantini et al., 2023). Les grandes entreprises adoptent progressivement des solutions technologiques afin de renforcer leur performance concurrentielle, soutenues par des politiques gouvernementales favorisant la digitalisation (Ghoneim & Mandour, 2023). En revanche, les PME dominent largement l'économie régionale, mais ils sont souvent ralentis par divers obstacles, tels que l'insuffisance de ressources financements, le manque d'infrastructures numériques adaptées et le manque de compétences spécialisées, comme dans le cas des PME en Tunisie, par exemple (Adair & Fhima, 2013). Par ailleurs, cette transition numérique est pareillement conditionnée par des défis socio-économiques, parmi lesquels, nous pouvons citer le chômage élevé et les disparités dans l'accès à Internet dans certaines régions (Allaouat, 2016). Le Tableau 1.13 résume quelques spécificités des entreprises nord-africaines en contexte de la maturité numérique.

Tableau 1.13 Maturité numérique dans les entreprises nord-africaines

Critères	Entreprises nord-africaines	Références
Infrastructure numérique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Des entreprises au début de leur processus de transformation numérique.</li> <li>- Les grandes agglomérations bénéficient de solides infrastructures, alors que les régions rurales rencontrent des difficultés d'accès.</li> <li>- L'investissement en technologie est restreint avec des initiatives qui commencent à susciter des financements pour accaparer la transformation numérique.</li> <li>- Un intérêt encore restreint, mais en pleine croissance pour l'adoption des technologies émergentes.</li> </ul>	(Arribi & Boutarfa, 2024), (Ben Youssef, 2021), (Ghoneim & Mandour, 2023).
Culture d'innovation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La culture d'innovation est en pleine expansion grâce à des initiatives favorisant la créativité et l'esprit entrepreneurial.</li> <li>- Les compétences numériques demeurent insuffisantes, ce qui pousse au développement de programmes de formation pour y remédier.</li> <li>- Les écosystèmes d'innovation commencent à se développer grâce à des initiatives visant à attirer des investisseurs et à soutenir les entreprises en démarrage.</li> <li>- La collaboration internationale est encore en construction, mais des initiatives régionales commencent à prendre forme.</li> </ul>	(El Aynaoui et al., 2022), (Djeflat, 2006).

Tableau 1.13 Maturité numérique dans les entreprises nord-africaines (suite)

Critères	Entreprises nord-africaines	Références
Réglementations et politiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les politiques varient d'un pays à l'autre, certains adoptant des stratégies claires pour promouvoir la numérisation, tandis que d'autres sont confrontés à l'absence de cadre réglementaire.</li> <li>- La prise de conscience de l'impact environnemental croît, bien que les initiatives visant à intégrer la durabilité dans la numérisation restent encore rares.</li> </ul>	(Chouaibi et al., 2022), (Nachit & Belhcen, 2020), (Youssef, 2024).

L'analyse des Tableaux 1.11, 1.12 et 1.13 nous montre que les entreprises québécoises et les entreprises européennes ont atteint un niveau plus avancé dans leur transformation numérique. En revanche, les entreprises nord-africaines se trouvent encore en phase de développement, avec des écarts significatifs dans l'adoption technologique et la maîtrise des compétences numériques.

Les écarts de maturité numérique entre régions mettent en évidence l'importance des politiques publiques, des ressources et du contexte socio-économique. L'Europe étant en avance, le Québec présente des disparités et l'Afrique du Nord fait face à des obstacles structurels malgré des initiatives en cours. Ces écarts soulignent l'importance du cadre socio-économique, des politiques gouvernementales et de l'accès aux ressources pour la transformation numérique des entreprises. En somme, faire renforcer la collaboration internationale pourrait favoriser une accélération des progrès dans les régions moins développées.

### c) État de la SST dans les entreprises québécoises, européennes et nord-africaines

Les variations de maturité numérique d'une région à l'autre ont un impact direct sur les pratiques de SST dans ces régions.

### - SST dans les entreprises québécoises

Au Québec, la protection de la SST repose sur un cadre juridique rigoureux, comprenant notamment la loi sur les accidents du travail, la loi sur la SST et les maladies professionnelles. Ces textes législatifs établissent des responsabilités claires pour les employés et les employeurs afin de minimiser les risques liés au milieu professionnel (Champoux & Brun, 2010; Marchand et al., 2014; Vézina et al., 2011). Par ailleurs, les entreprises québécoises se tournent de plus en plus vers des solutions digitales et des technologies automatisées, transformant profondément les approches en matière de gestion de la sécurité (Badri et al., 2013; Benmokrane, 2022). Des secteurs comme la construction et l'industrie manufacturière continuent de présenter des taux d'accidents préoccupants malgré ces avancées technologiques, ce qui exige un effort soutenu en prévention (Racine, 2021). Le système québécois s'appuie également sur la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST), une institution centrale pour encourager l'adoption d'une véritable culture axée sur la prévention des accidents (Baril-Gingras & Cox, 2022; Busque et al., 2022). Le Tableau 1.14 résume quelques spécificités des entreprises québécoises en contexte de la SST.

Tableau 1.14 SST dans les entreprises québécoises

Critères	Entreprises québécoises	Références
Culture de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Culture de sécurité bien ancrée au sein des grandes entreprises</li> <li>- Programmes et formations normalisés</li> <li>- Mise en avant de la recherche et du développement pour optimiser la SST</li> </ul>	(Champoux & Brun, 2010), (Marchand et al., 2014), (Bignon & Badri, 2019), (Vézina et al., 2011), (Faye, 2021).
Cadre législatif	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Présence de normes à la fois provinciales et fédérales</li> <li>- Certifications OHSAS 18001 et ISO 45001 largement utilisées</li> </ul>	(Busque et al., 2020), (Boulenger & Vaillancourt, 2012).

Tableau 1.14 SST dans les entreprises québécoises (suite)

Critères	Entreprises québécoises	Références
Gestion des risques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Systèmes sophistiqués et programmes de prévention requis</li> <li>- Mise en place de systèmes de suivi stricts et d'audits fréquents</li> <li>- Adaptabilité face aux nouveaux risques en matière de SST</li> <li>- Prise en compte de l'ergonomie et de la prévention des troubles musculosquelettiques, ainsi que des risques psychosociaux</li> </ul>	(Imbeau et al., 2012), (Côté, 2010).
Numérisation et SST	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lancement de l'intégration avec des initiatives pilotes</li> <li>- Investissements conséquents dans la prévention des risques</li> <li>- Les défis principaux sont : la fatigue, le stress et l'augmentation de l'automatisation</li> </ul>	(Badri, 2015).

#### - SST dans les entreprises européennes

En Europe, la SST bénéficie d'une uniformité notable grâce aux directives de l'Union européenne, en particulier la Directive-Cadre 89/391/CEE, qui établit les bases générales de protection et de prévention. Cette coordination favorise une standardisation des pratiques entre les pays membres, bien que des écarts persistent dans leur application locale (Bianchini et al., 2017; Hale, 2019; Sakowski & Marcinkiewicz, 2019). Les entreprises européennes accordent une attention spécifique à l'identification et à la gestion des risques émergents, spécifiquement ceux découlant de l'économie circulaire et de la transition numérique (Gagliardi et al., 2012). Cependant, les PME sont confrontées à des enjeux organisationnels et financiers qui

compliquent leur conformité aux exigences légales (Cagno et al., 2011). Le Tableau 1.15 résume quelques spécificités des entreprises européennes en contexte de la SST.

Tableau 1.15 SST dans les entreprises européennes

Critères	Entreprises européennes	Références
Culture de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La culture de la sécurité varie en fonction des différents secteurs</li> <li>- Formation en SST obligatoire pour les employés</li> <li>- Soutien important à la recherche en SST, avec des subventions accessibles</li> </ul>	(Bianchini et al., 2017), (Gagliardi et al., 2012), (Bignon & Badri, 2019).
Cadre législatif	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Directive européenne sur la SST</li> <li>- Adoption généralisée de la norme ISO 45001</li> </ul>	(Safety & Work, 2023)
Gestion des risques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Politiques concernant les risques émergents, telles que ceux liés à l'Industrie 4.0</li> <li>- Vérifications périodiques et évaluations internes</li> <li>- Capacité à faire face aux risques émergents grâce à des protocoles spécifiques</li> <li>- Priorité accordée aux risques liés aux produits chimiques, à l'ergonomie et aux technologies émergentes</li> </ul>	(Sakowski & Marcinkiewicz, 2019), (Morillas et al., 2013),
Numérisation et SST	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Initiatives progressives dans le domaine de la SST numérique</li> <li>- Aides financières publiques pour la SST dans certaines industries</li> <li>- Les défis principaux sont les risques associés aux substances dangereuses et aux technologies numériques</li> </ul>	(Jarota, 2021)

#### - SST dans les entreprises nord-africaines

En Afrique du Nord, la SST est en phase de développement, avec des cadres réglementaires qui varient significativement d'un pays à l'autre. Des nations comme le Maroc et la Tunisie ont

adopté des lois inspirées des standards internationaux, mais leur mise en application reste un défi majeur en raison des limites en ressources financières et humaines. Les secteurs de l'agriculture et de l'industrie lourde présentent des risques élevés, souvent exacerbés par une sensibilisation insuffisante à la prévention des accidents (Benakka et al., 2021; Laraqui et al., 1999). Cependant, des efforts notables sont observés dans la promotion de la culture SST, notamment grâce à des initiatives de collaboration avec des organisations internationales, telles que l'Organisation internationale du travail (OIT). Les entreprises locales commencent à intégrer des technologies afin d'améliorer la gestion des risques, mais ces avancées restent limitées à certaines grandes entreprises (Benkhalifa, 2024). Le Tableau 1.16 résume quelques spécificités des entreprises nord-africaines en contexte de SST.

Tableau 1.16 SST dans les entreprises nord-africaines

Critères	Entreprises de l'Afrique du Nord	Références
Culture de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La culture en développement est moins présente dans les PME</li> <li>- La formation se limite fréquemment à l'intégration des nouveaux employés</li> <li>- La recherche en SST est restreinte, particulièrement dans les grandes entreprises</li> </ul>	(Benali, 2018), (Tarik & Adil, 2018), (Laraqui et al., 2018).
Cadre législatif	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les législations en évolution sont influencées par OIT</li> <li>- Usage limité de normes internationales</li> <li>- La sécurité des machines et la prévention des accidents fondamentaux</li> </ul>	(Laraqui et al., 1999).
Gestion des risques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Une approche en partie structurée, principalement axée sur la réaction</li> <li>- Le système d'évaluation est restreint et souvent ponctuel</li> <li>- La capacité d'adaptation est en expansion, mais reste encore restreinte.</li> </ul>	(Jemaa, 2013).

Tableau 1.16 SST dans les entreprises nord-africaines (suite)

Critères	Entreprises de l'Afrique du Nord	Références
Numérisation et SST	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'adoption reste faible et varie en fonction des secteurs industriels</li> <li>- Les financements et investissements sont souvent restreints</li> <li>- Les défis principaux sont : la conscientisation et l'adoption de pratiques modernes</li> </ul>	(Benkhalfa, 2024).

L'examen comparatif des tableaux 1.14, 1.15 et 1.16 met en lumière que les organisations québécoises et européennes bénéficient souvent de dispositifs de SST mieux développés, appuyés par des cadres législatifs stricts et une forte inclination pour l'adoption des technologies numériques. En revanche, les entreprises nord-africaines rencontrent des défis significatifs liés aux réglementations, à leur mise en œuvre et à l'intégration des outils technologiques modernes pour améliorer la protection des travailleurs malgré des avancées achevées dans certains secteurs.

La comparaison révèle des différences marquées en SST. Il s'agit d'une avance européenne grâce à un cadre réglementaire uniifié, des vulnérabilités persistantes au Québec malgré une organisation structurée, et une progression limitée, mais prometteuse en Afrique du Nord avec l'adoption croissante de normes internationales. Ainsi, chaque région se distingue par des atouts et des défis propres, reflétant des priorités variées et des niveaux de maturité différents dans la prévention des risques professionnels.

## 1.2. Risques à l'ère de l'Industrie 4.0

Cette partie examine l'émergence de nouveaux risques dans le cadre de l'Industrie 4.0, en réponse à l'évolution des technologies. Elle commence par une présentation des diverses définitions du risque, suivie d'une analyse des modèles employés pour évaluer ces risques dans le milieu industriel. Elle se focalise sur les risques émergents.

### 1.2.1. Définitions et modèles

Il existe une grande variété de définitions et de modèles de risque dans les domaines scientifique et professionnel. Le Tableau 1.17 présente une classification des définitions les plus pertinentes du risque. Le modèle ou la définition (3) est considéré comme le plus adapté (Aven, 2012).

Le concept de risque est généralement décrit en termes de sources potentielles, d'événements probables, ainsi que de la fréquence et des impacts de ces événements, conformément à la norme ISO 31000:2018 (Hutchins, 2018). Selon la norme ISO 45001:2018, un risque pour la SST est défini comme la combinaison de la probabilité qu'un événement dangereux lié au travail ou une exposition se produise, et de la gravité des blessures ou des problèmes de santé qui peuvent en résulter (Karanikas et al., 2022). Ces définitions sont incluses parmi les modèles de risque présentés dans le Tableau 1.17, ce qui met en évidence comment le modèle (2) est adapté à la définition du risque professionnel. L'application de ces définitions et ces modèles requiert de nouvelles méthodes et ajustements pour faire face aux risques émergents.

Tableau 1.17 Principaux modèles de risque utilisés dans les domaines professionnel et scientifique (Aven, 2012)

<b>Numéro du modèle</b>	<b>Modèle</b>	<b>Description</b>
1	R=V	Risque=Valeur attendue (perte)
2	R=P&C	Risque=Probabilité et scénarios/Conséquences/gravité des conséquences
3	R=C&I	Risque=Conséquences/dommages/gravité de celles-ci + Incertitude
4	R=I	Risque=Incertitude
5	R=IO	Risque=Incertitude objective
6	R=C	Risque=Évènement ou conséquence
7	R=ISO	Risque=Évènement ou conséquence

Une fois les définitions et les modèles traditionnels du risque sont abordés, il devient crucial de se concentrer sur une catégorie de risque qui prend de plus en plus d'importance dans un environnement en perpétuelle mutation : le risque émergent. Cette section a pour objectif de

clarifier ce concept particulier et d'examiner les facteurs qui favorisent son apparition ainsi que les stratégies pour le gérer.

### **1.2.2. Risque émergent**

Les termes « risque émergent » et « risque nouveau et émergent » sont utilisés de manière interchangeable. Cependant, certaines différences significatives peuvent être observées dans la littérature technique et scientifique. Ces différences soulignent un problème évident de consensus sur la terminologie et l'interprétation autour du risque émergent (Brocal, 2016; Cantonnet et al., 2019). Les travaux de Brocal, Sebastián, et al. (2017) et Brocal, González and Sebastián (2018) proposent des modèles et des approches pour réduire l'incertitude associée.

Le concept de « risque émergent » englobe tout danger qui est à la fois nouveau et/ou en expansion. Selon l'International Risk Governance Council (IRGC), le risque émergent est envisagé sous un angle systémique. Cette approche systémique du risque considère à la fois les nouvelles conditions qui émergent et celles qui sont totalement inédites (IRGC, 2015). Un risque est dit émergent lorsqu'il est globalement nouveau, comme c'est le cas avec les technologies innovantes ou les matériaux récents (Graham et al., 2010).

En outre, un risque peut également être considéré comme émergent lorsqu'il est bien connu ou traditionnel, mais qu'il apparaît dans des contextes inédits ou atypiques. Dans les deux situations, l'incertitude demeure la caractéristique clé du risque émergent. Selon les auteurs, le risque est une des conséquences de cette incertitude. Ils décrivent l'incertitude comme le cadre dans lequel les risques apparaissent, affectant négativement les résultats d'un projet, ou les opportunités, influençant positivement la performance du projet (Perminova et al., 2008). Le risque émergent se prête particulièrement bien au modèle (4) ( $R=I$ ). Cependant, l'IRGC souligne que cette incertitude est liée aux probabilités et/ou aux impacts du risque émergent. Par conséquent, le modèle (2) pourrait également s'appliquer (IRGC, 2015).

Un cadre théorique permettant de modéliser le concept de risque émergent, notamment dans les processus industriels, repose sur le modèle de risque suivant : un risque ( $R$ ) est défini par cinq éléments : la source du risque (SR), les causes (C), les événements (E), les conséquences (CO) et la probabilité (P). Ces éléments sont représentés par la formule :  $R = (SR, C, E, CO, P)$  (modèle 8) (Brocal, González, et al., 2017).

La TICHNER (technique pour identifier et caractériser les risques émergents) est une approche développée pour reconnaître et décrire les risques émergents liés à un système de production

(Brocal, González, & Sebastián, 2018). Cette méthode met l'accent sur la définition des risques émergents, qui a été formalisée à l'aide de conditions précises (C1, C2, C3, C4, C5 et C6) permettant de caractériser un risque émergent. Ces conditions sont regroupées dans le Tableau 1.18 (Brocal, Sebastián, et al., 2017).

Le Tableau 1.18 présente les différentes combinaisons possibles entre les conditions Ci et les composantes du risque pouvant former un risque émergent. De ce fait, selon la combinaison dans chaque cas d'intérêt qui permet la caractérisation du risque émergent, le risque peut être analysé avec l'un des modèles du Tableau 1.17.

Tableau 1.18 Combinaisons possibles entre les conditions Ci et les composants du risque pouvant former un risque émergent (Brocal, González, et al., 2017)

Conditions		Les composants du risque				
		La source du risque (SR)	Les causes (C)	Les événements (E)	Les conséquences (CO)	La probabilité (P)
Nouveau	C1	(SR,C1)	(C,C1)			
	C2	(SR,C2)	(C,C2)	(E,C2)	(CO,C2)	
	C3	(SR,C3)	(C,C3)	(E,C3)	(CO,C3)	
En augmentation	C4	(SR,C4)				
	C5					(P,C5)
	C6				(CO,C6)	

- C1 : Nouvelle variable technologique ou organisationnelle.
- C2 : Nouvelle perception sociale.
- C3 : Nouvelles connaissances scientifiques.
- C4 : Augmentation du nombre de sources de risque.
- C5 : Augmentation de la probabilité d'exposition.
- C6 : Augmentation des conséquences pour la santé.

Un risque émergent est un risque nouveau (NR, new risk) et/ou un risque en augmentation (IR, increasing risk). Un risque est considéré comme nouveau lorsqu'il répond aux trois conditions

C1, C2 et C3. En revanche, un risque est qualifié de croissant lorsqu'il est lié aux conditions C4, C5 et C6 (Brocal, González, et al., 2017).

Les Figures 1.4 et 1.5 montrent de manière nette la différence entre les risques émergents, les NR, les IR et les risques traditionnels (TR). Les risques émergents sont ceux qui émergent récemment ou évoluent rapidement, alors que les NR font référence à des menaces qui n'existaient pas auparavant ou qui ont connu une évolution importante. Les IR représentent des dangers qui croissent ou se renforcent avec le temps. Pour finir, les TR regroupent les menaces établies et reconnues depuis longtemps. Cette typologie aide à mieux saisir et gérer les divers types de risques auxquels nous pouvons être exposés (Brocal, González-Gaya, et al., 2019).

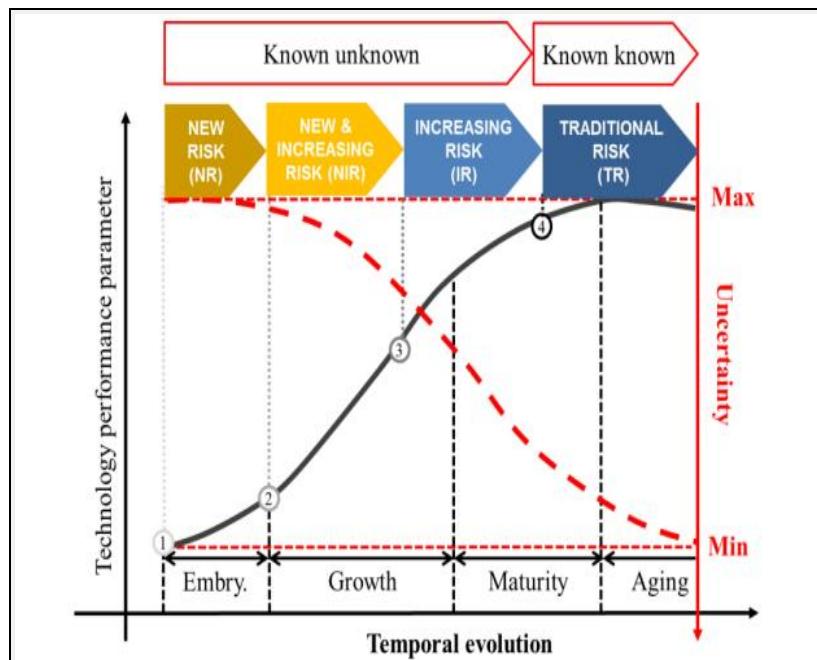


Figure 1.4 Risque émergent, risque croissant, risque nouveau et risque traditionnel (Brocal, González-Gaya, et al., 2019)

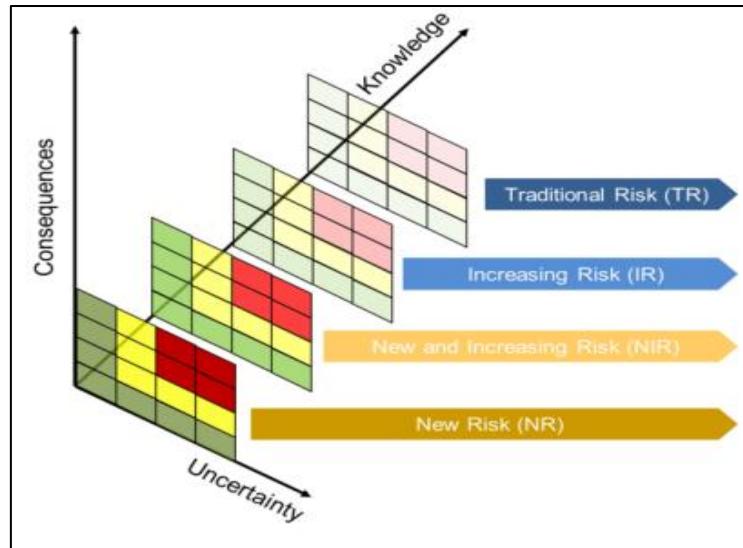


Figure 1.5 Approche qualitative pour l'analyse des risques émergents basée sur une matrice de risque conséquence/incertitude et sur la nouvelle dimension de la connaissance (Brocal, González-Gaya, et al., 2019)

Les types de risques sont associés aux différentes phases de l'évolution du risque, lesquelles peuvent être incorporées dans le cycle de vie technologique pour assurer une gestion efficace. En effet, au début du développement d'une nouvelle technologie, le NR fait son apparition. Ensuite, à mesure que la technologie progresse, se trouvant entre la phase de maturité et celle du déclin, l'IR évolue pour devenir un TR (Brocal, González, et al., 2017).

Dans ce processus de maturation et de déclin du risque émergent, la variable d'incertitude a été intégrée (Brocal, González, et al., 2017). Cette approche intègre le cadre dynamique de gestion du risque établi par Villa et al. (2016) ainsi qu'une approche qualitative ouverte fondée sur la perspective d'Aven (2010).

Dans ce contexte, nous pouvons affirmer que le risque, l'incertitude et le risque émergent évoluent en sens inverse. Plus précisément, lorsque le risque est à un stade précoce, l'incertitude est à son plus haut niveau, tandis qu'une fois que le risque émergent est éteint, l'incertitude atteint son niveau le plus bas. Cependant, cette valeur minimale est relative au risque émergent et, par conséquent, elle ne doit pas nécessairement être considérée comme faible ou négligeable par rapport au TR (Brocal, González-Gaya, et al., 2019).

Une fois les risques émergents définis et explorés, il est essentiel de s'intéresser à leur gestion. Cette section sera dédiée aux stratégies et aux méthodes visant à identifier, évaluer et maîtriser ces risques de manière efficace dans un environnement en perpétuelle évolution.

### **1.3. Gestion des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0**

Pour aborder la gestion des risques dans le contexte de l'Industrie 4.0, il est crucial de saisir les bases de cette discipline et leur application en SST. Cette partie offre un aperçu des principes de la gestion des risques. Elle analyse en profondeur ses spécificités et défis dans le domaine de la SST, en lien avec les technologies propres à l'Industrie 4.0. Nous explorerons également les approches de gestion des risques de SST adaptées à cette nouvelle ère technologique, afin de mieux comprendre leur rôle dans la prévention des incidents et la protection des travailleurs au sein d'un environnement toujours plus automatisé et connecté.

#### **1.3.1. Gestion des risques : fondements et principes**

L'ingénierie se focalise sur les éléments de risque, l'instauration et l'amélioration des mesures de contrôle, ainsi que sur la conception, la construction, les opérations, les limites d'utilisation et l'entretien des systèmes, englobant les processus de mise en service et d'arrêt, ainsi que la gestion des situations d'urgence (Domingues et al., 2013). La complexité offre un cadre théorique essentiel pour les recherches interdisciplinaires indispensables à la gestion des risques et à la gestion intégrée de la sécurité (Coze, 2005). La contribution majeure de la théorie de la complexité à la gestion repose sur sa faculté à enrichir la planification et l'analyse de divers enjeux organisationnels (Amaral & Uzzi, 2007).

La gestion des risques doit être expliquée en détail. D'après la norme internationale ISO 31000:2009, la gestion des risques constitue un ensemble d'activités et de méthodes coordonnées destinées à encadrer une organisation tout en contrôlant les différents risques qui pourraient impacter sa capacité à réaliser ses objectifs. L'incorporation de la gestion des risques est maintenant un aspect fondamental de la culture organisationnelle, alors que la perspective classique se restreint souvent à un simple élément de la qualité (Motet, 2009).

La gestion des risques doit embrasser une approche stratégique liée à la gestion de projets, en intégrant les fonctions essentielles à chaque étape du cycle de vie. Elle doit être élaborée pour repérer un maximum de risques potentiels, perçus comme des éléments cruciaux pour optimiser la valeur ajoutée tout en réduisant les risques. Ces informations sont essentielles pour identifier les menaces et établir les éléments clés nécessaires à la prise de décision. La gestion méthodique de projets complexes nécessite des compétences avancées en gestion de l'information et en systèmes d'aide à la décision, capables de faciliter l'évaluation des options en temps réel (Jaafari, 2001).

Les recommandations pour la gestion des risques exigent l'appui de théories et de modèles appropriés pour différents secteurs, services, industries, projets ou organisations. Afin d'être réellement performante et de s'adapter au mieux à l'environnement de travail concret, la gestion des risques doit être intégrée dans des systèmes complexes, en considérant ses composantes essentielles. Quand il s'agit de satisfaire des exigences particulières, la gestion des risques fait face à des obstacles dans plusieurs domaines. Ainsi, l'analyse des risques dans des opérations intégrées peut être améliorée par l'emploi de modèles de risque sophistiqués et de contextes dynamiques (Grøtan et al., 2011).

La gestion des risques suit plusieurs étapes essentielles qui visent à repérer, évaluer et réduire les risques au sein d'une organisation ou d'un projet. Voici une vue d'ensemble de ce processus (Hutchins, 2018) :

- Repérage des risques : repérer les risques possibles susceptibles d'affecter le projet, l'organisation ou le processus. Cela inclut les risques opérationnels, financiers, techniques, réglementaires et environnementaux.
- Évaluation des risques : étudier les risques identifiés afin d'évaluer la probabilité de leur réalisation et les conséquences possibles. Cela peut impliquer l'utilisation de méthodes qualitatives ou quantitatives, comme les matrices de risques ou les modèles probabilistes.
- Analyse des risques : classer les risques selon leur priorité en fonction de leur gravité et de la probabilité de leur occurrence permet de déterminer ceux qui nécessitent une attention ou des ressources urgentes.
- Traitement des risques : développer des stratégies pour réduire ou éliminer les risques, tels que l'évitement, la réduction, le transfert, ou l'acceptation si le risque est jugé faible.
- Surveillance et examen des risques : surveiller de façon continue les risques et l'efficacité des mesures d'atténuation et modifier les stratégies si nécessaire, notamment en cas de nouveaux risques ou de changements dans la gravité des risques existants.
- Communication et rapports : informer régulièrement les parties prenantes sur l'état des risques et des actions d'atténuation, afin de garantir que chacun soit bien informé des risques majeurs et des mesures mises en place pour les gérer.

Ce processus permet d'anticiper les problèmes potentiels et garantit que les risques sont abordés de façon adéquate, en ligne avec les objectifs de l'organisation.

Après avoir posé les principes fondamentaux de la gestion des risques, il est pertinent d'examiner comment ces pratiques évoluent à l'ère de l'Industrie 4.0. La section suivante mettra en évidence les ajustements nécessaires et les nouvelles approches mises en place pour gérer les risques émergents dans un environnement industriel de plus en plus numérique et interconnecté.

### **1.3.2. Gestion des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0**

L'Industrie 4.0 a transformé en profondeur notre compréhension des systèmes de travail en sécurité industrielle. Actuellement, ces innovations se déploient surtout dans le secteur manufacturier, mais elles touchent également d'autres secteurs, tels que la logistique, l'agroalimentaire et la construction (Winkelhaus & Grosse, 2020). L'Industrie 4.0 intègre non seulement de nouvelles technologies, mais elle redéfinit aussi les systèmes de travail traditionnels en les transformant en réseaux fortement interconnectés, réunissant des personnes et des technologies (Kamble et al., 2018).

Les systèmes industriels associés au concept de l'Industrie 4.0, qui comprennent de nombreux éléments interconnectés dans une architecture en réseau, peuvent être jugés complexes. Ces éléments peuvent être à la fois physiques et cyber-physiques, opérant de façon variée. Ils sont agencés en une hiérarchie de sous-systèmes tout en participant au fonctionnement global du système (Zio, 2016). Il est clair que la gestion de ces organisations présente de nouveaux défis, notamment des incertitudes considérables dues à une complexité en constante évolution (Komljenovic et al., 2017). Les processus industriels utilisant des technologies et des procédés de fabrication de pointe peuvent engendrer une dynamique accrue dans les opérations, tout en augmentant la complexité des processus de production. Cela contribue à la création d'environnements de travail plus intelligents (Badri et al., 2018).

L'émergence de l'Industrie 4.0 a entraîné une transformation majeure dans la manière dont la sécurité industrielle est abordée dans les systèmes de travail. Cette nouvelle ère ne se contente pas d'introduire des technologies avancées, elle transforme également les systèmes de travail traditionnels en réseaux fortement interconnectés de technologies, de personnes et d'unités commerciales (Kamble et al., 2018).

L'émergence de l'Industrie 4.0 provoquera une révolution dans les approches de gestion de la sécurité (Kamble et al., 2018). L'industrie traditionnelle possède ses problèmes spécifiques. Quand ces enjeux s'associent aux difficultés engendrées par le nouveau paradigme de

l’Industrie 4.0 et la complexité accrue, il devient essentiel d’établir des approches avancées et méthodiques pour une gestion performante des risques, englobant tant les risques classiques que ceux émergents. Il est fondamental de traiter ces risques émergents en combinant diverses méthodes afin d’optimiser le processus de prise de décision (Roig & Brocal, 2019). La gestion de ces risques émergents englobe à la fois les risques professionnels et les risques industriels, en raison de leur interconnexion étroite. Le facteur humain constitue le principal point de connexion entre ces deux types de risques (Brocal, González, Reniers, et al., 2018).

Si les technologies de l’Industrie 4.0 évoluent de manière isolée et que les initiatives des décideurs en matière de SST sont désorganisées, les risques pourraient augmenter et une partie des avancées obtenues dans la gestion des dangers pourrait être compromise (Badri et al., 2018).

La recherche de Badri et al. (2018) se concentre spécifiquement sur l’intégration du concept de l’Industrie 4.0 dans la SST. Leur étude aborde quatre aspects de la SST : les entités de travail, les cadres législatifs et réglementaires associés à la SST, les systèmes de gestion en matière de SST, ainsi que la gestion des risques liés au travail. Les systèmes de production avancés peuvent engendrer de nouveaux risques pour la SST, que les méthodes traditionnelles d’évaluation des risques professionnels semblent souvent incapables d’identifier efficacement (Fernández & Pérez, 2015).

Les mesures de SST ont largement évolué depuis les débuts de la révolution industrielle. Au départ, les premières démarches avaient pour objectif de diminuer les accidents industriels en établissant des règles de sécurité fondamentales et des sanctions. Par la suite, les nations développées ont mis en place de nouvelles régulations contraignant les entreprises à renforcer la sécurité et à adopter des stratégies pour gérer les risques (Häkkinen, 2015).

Les normes en matière de SST permettront certainement une transition en douceur pour les entrepreneurs vers des systèmes intelligents et autonomes. Elles aideront à surmonter des défis, tels que la mauvaise classification des dangers et les difficultés d’organisation des mesures de précaution au sein des nouvelles entreprises (Badri et al., 2018).

En dépit des initiatives législatives, de l’instauration de nouvelles règles et procédures, ainsi que de l’attention accrue des instances compétentes, il apparaît que des lacunes persistent, entraînant la continuité des risques et des défaillances au sein des milieux de travail (Häkkinen, 2015). Par ailleurs, les progrès technologiques, tels que l’Industrie 4.0 ont introduit des

complexités additionnelles aux défis déjà présents, mettant en évidence l'importance d'analyser le lien possible entre les éléments de l'Industrie 4.0 et la gestion de la SST (Badri et al., 2018).

Le manque de normes ou de mises à jour adéquates en fonction des progrès technologiques peut engendrer des conséquences considérables sur la SST. Les systèmes de fabrication avancés, tels que ceux intégrant le contrôle à distance via l'informatique en nuage et l'IoT, ainsi que les capteurs qui augmentent l'autonomie des machines, ne disposent pas de normes adaptées aux spécificités des systèmes conventionnels (Fernández & Pérez, 2015).

Dans le contexte de la SST, la norme ISO 45001:2018 décrit le système de management comme un ensemble d'éléments interconnectés ou dépendants au sein d'une organisation, visant à établir des objectifs, des politiques et des processus pour les atteindre. En parallèle, elle décrit le système de management de la SST comme un système de gestion ou une partie intégrante de celui-ci, visant à appliquer la politique de SST (Karanikas et al., 2022; Šolc et al., 2022).

Avec l'évolution des systèmes organisationnels, le développement des systèmes homme-machine et l'intégration de disciplines polyvalentes, telles que l'ergonomie, ont ouvert de nouvelles perspectives pour gérer les complexités des processus et des opérations liées aux nouvelles technologies. De plus, des systèmes de gestion de la santé et de la sécurité au travail (SGSST) ont été établis pour traiter les risques liés aux accidents majeurs et aux questions de santé dans différents secteurs industriels. L'attention grandissante portée à la gestion de la SST a également conduit à un renforcement des réglementations concernant les pratiques, avec des normes telles que l'OHSAS 18001 et l'ANSI Z10. Les SGSST constituent des outils systématiques qui assistent les organisations dans la gestion des risques professionnels et aident les responsables à garantir le respect des normes de SST sur le lieu de travail (Granerud & Rocha, 2011).

Les risques émergents peuvent résulter de l'intégration de technologies récentes, de méthodes novatrices et de nouveaux cadres de travail, ainsi que d'évolutions et de transformations au sein des structures organisationnelles ou sociétales (Fernández & Pérez, 2015). Dans son rapport d'experts sur les risques physiques émergents, l'Agence européenne pour la SST souligne les préoccupations croissantes liées à l'interaction complexe entre l'homme et la machine (Brun, 2009).

Concernant les risques émergents, la sophistication croissante des interfaces entre l'homme et la machine est considérée comme un défi ergonomique significatif. D'après les experts en

risques émergents de l'Agence européenne pour la SST, cette complexité grandissante, due aux avancées technologiques, aux modifications des processus de travail et à une conception inadéquate des interfaces homme-machine, pourrait entraîner une intensification de la pression mentale sur les employés (Brun, 2009).

Ces industries recourent à des méthodes d'analyse des risques, dont la majorité a été élaborée il y a plus de cinquante ans, et qui demeurent des outils standards pour l'analyse de la sécurité industrielle (Harms-Ringdahl, 2001). Ces méthodes ont été conçues en tenant compte de risques associés à des conditions relativement constantes dans le passé. Cependant, les systèmes de travail contemporains sont désormais beaucoup plus complexes et mettent en lumière de nouveaux risques émergents (Fernández & Pérez, 2015).

Les caractéristiques majeures de l'Industrie 4.0, telles que l'intégration de systèmes autonomes, l'interconnexion, l'automatisation des interactions homme-machine et les nouvelles approches de supervision, redéfinissent les enjeux en matière de SST. L'essor des machines autonomes, des robots collaboratifs et des connexions étendues entre les logiciels, les équipements et les objets connectés impose à la communauté de la sécurité de repenser les méthodes d'analyse des risques. Ces avancées transforment profondément les systèmes sociotechniques critiques pour la sécurité, tout en mettant en évidence les limites des approches méthodologiques et théoriques actuelles (Hulme et al., 2019).

### **1.3.3. Approches de gestion des risques de SST**

Au fil des dernières décennies, la gestion des installations industrielles s'est considérablement complexifiée, notamment en raison des interactions, de l'automatisation des tâches, de la structure des processus et de la multiplication des composants (Gattola et al., 2018). L'augmentation de l'autonomie des machines, l'utilisation de robots collaboratifs et l'interconnexion étendue entre logiciels, matériels et équipements, aussi bien au sein des unités commerciales qu'entre elles, amènent la communauté de la sécurité à envisager de nouveaux enjeux pour la SST dans le contexte de l'Industrie 4.0 (Badri et al., 2018).

Ces évolutions modifient la nature des systèmes sociotechniques critiques pour la sécurité, révélant les limites théoriques et méthodologiques des approches actuelles d'analyse des accidents. Le défi de la sécurité dans un contexte d'interconnectivité ne se résout pas en augmentant simplement la fiabilité des interfaces ; il modifie les pratiques de travail

traditionnelles, ajoute de la complexité et peut diminuer la transparence des processus sous-jacents (Hulme et al., 2019).

La norme ISO 45001, bien qu'elle soit essentielle pour la gestion de la SST, intervient principalement à un niveau global en matière de mesure et de réduction des risques liés à la sécurité (Karanikas et al., 2022; Šolc et al., 2022). Elle définit des exigences et des stratégies pour la gestion des systèmes de sécurité à l'échelle internationale, mais, à la différence de la norme ISO 31010, elle ne propose pas de méthodes détaillées pour évaluer les risques liés aux méthodes d'analyse de sécurité spécifiques aux systèmes de travail (Lalonde & Boiral, 2012). Bien que la norme ISO 45001 joue un rôle clé en tant qu'une approche globale pour la gestion de la SST, elle ne couvre pas la collecte et l'examen des méthodes d'analyse de sécurité. En revanche, la norme ISO 31010 est devenue un outil incontournable pour de nombreux responsables de la sécurité dans le domaine de la SST (Hutchins, 2018).

### a) Approches traditionnelles d'analyse de la sécurité

L'industrie utilise diverses méthodes d'analyse des risques, dont plusieurs ont été développées il y a plus de 50 ans. Parmi celles-ci figurent des approches telles que l'analyse des causes profondes, conçue avant la Seconde Guerre mondiale (Waterson et al., 2015), l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (FMEA), introduite en 1949, et l'analyse des dangers et de l'exploitabilité (HAZOP), qui a émergé dans les années 1960 (Hollnagel, 2008). Ces méthodes ont été développées en prenant en considération des risques spécifiques, associés à des conditions relativement stables. Cependant, les systèmes de travail modernes sont désormais plus complexes et présentent des risques émergents (Fernández & Pérez, 2015). Une des principales critiques des méthodes traditionnelles d'analyse de la sécurité est leur capacité limitée à traiter uniquement des relations de cause à effet linéaires, ce qui les rend inadaptées pour analyser les comportements complexes ou émergents des systèmes (Waterson et al., 2015).

Certaines méthodes traditionnelles ne permettaient pas de montrer de quelle manière l'interaction entre les différents éléments d'un système, y compris les paramètres de gestion, organisationnels et humains, pouvait conduire à un accident (Underwood & Waterson, 2013). De plus, l'application de méthodes traditionnelles, telles que l'analyse de l'arbre des défaillances, FMEA, ainsi que HAZOP, a été considérée comme insuffisante (Mahajan et al., 2017).

Les méthodes de gestion de la SST les plus fréquemment employées, dont plusieurs sont également citées dans la norme ISO 31010, incluent des outils souvent jugés inappropriés. Bien que la norme ISO 31010 les considère comme des techniques d'évaluation des risques, des exemples de ces outils disqualifiés sont les remue-méninges, les entretiens semi-structurés, la méthode Delphi et l'analyse décisionnelle multicritère. Cependant, certains de ces outils peuvent s'avérer utiles pour les experts ou les parties prenantes, notamment dans la collecte de données pour l'identification des dangers et l'évaluation des risques. Le processus analytique hiérarchique en est un exemple, étant une méthode d'analyse décisionnelle multicritère fortement structurée, qui peut servir de modèle hiérarchique pour évaluer la priorité des objectifs de SST (Chan et al., 2004). Le Tableau 1.19 répertorie différentes méthodes traditionnelles de sécurité au travail.

Tableau 1.19 Méthodes traditionnelles de gestion de la sécurité (Harms-Ringdahl, 2001; Lalonde & Boiral, 2012)

Méthode	Concept
HAZOP	Les écarts par rapport à la conception initiale de l'équipement sont identifiés en utilisant des mots-clés spécifiques. Ce processus est généralement effectué par une équipe de divers spécialistes au cours de plusieurs sessions de travail.
Event (Effect) Tree Analysis	Évalue les différents impacts possibles d'un événement dangereux identifié.
FMEA	Repère les dysfonctionnements des composants et évalue leurs répercussions sur le système.
Energy Analysis	Repère les sources d'énergie pouvant représenter un danger pour les êtres humains.
Fault Tree Analysis	Les facteurs causals sont déterminés de façon déductive, structurés logiquement et présentés sous forme de diagramme en arbre, qui illustre les liens entre ces facteurs et l'événement principal.
Job Safety Analysis	Repère les risques présents dans les procédures de travail.
Action Error Method	Repère les divergences par rapport aux procédures de travail établies susceptibles de causer des dangers.

Tableau 1.19 Méthodes traditionnelles de gestion de la sécurité (Harms-Ringdahl, 2001; Lalonde & Boiral, 2012) (suite)

Méthode	Concept
Deviation Analysis	Repère les écarts par rapport aux processus de production prévus et standards.
Change Analysis	Détermine les causes des problèmes en comparant avec des situations exemptes de difficultés.
Safety Function Analysis	Une analyse détaillée des fonctions de sécurité d'un système, comprenant une évaluation de leur pertinence ainsi que de leurs éventuelles lacunes.
Root Cause Analysis	Vise à identifier les causes fondamentales ou premières, plutôt que de se limiter à résoudre seulement les symptômes apparents.
Deterministic Probabilistic Risk Assessment (e.g., Risk Indices - FN Curves (the cumulative frequency 'F' of people affected 'N')	L'évaluation des risques probabilistes déterministes fournit une estimation semi-quantitative des risques, en s'appuyant sur des échelles de fréquence et de gravité.
Human Reliability Assessment	Identification et anticipation des erreurs humaines liées à des tâches rigoureusement définies.
Databases (e.g., Reaction Matrix—Consequence Analysis)	Évaluation des impacts des risques chimiques, tels que les incendies, explosions, émissions de gaz toxiques, ou l'analyse des effets toxiques et des interactions entre produits chimiques.
Bayesian Networks	Une méthode qui emploie un modèle graphique pour illustrer un ensemble de variables et leurs relations probabilistes. Le réseau est formé de nœuds représentant des variables aléatoires, avec des flèches reliant les nœuds parents aux nœuds enfants.
Cognitive Task Analysis	Une méthode d'analyse qui examine les processus mentaux fondamentaux à l'origine des erreurs.

Tableau 1.19 Méthodes traditionnelles de gestion de la sécurité (Harms-Ringdahl, 2001; Lalonde & Boiral, 2012) (suite)

Méthode	Concept
Bowtie Analysis	Une méthode simple et visuelle pour décrire et analyser les chemins d'un risque et les causes aux conséquences. Le diagramme en forme de cravate et l'accent sur les barrières entre les causes et le risque, ainsi qu'entre le risque et ses conséquences.
Layer Protection Analysis	C'est une méthode semi-quantitative utilisée pour évaluer les risques liés à des événements ou scénarios indésirables, ainsi que l'efficacité des mesures de contrôle en place. Une paire cause-conséquence est choisie, et les couches de protection préventives sont déterminées.

### b) Approches innovantes d'analyse de la sécurité basées sur une pensée complexe

Les approches actuelles d'évaluation de la sécurité en SST montrent des faiblesses face aux défis d'un environnement Industrie 4.0. Les méthodes traditionnelles font souvent défaut en termes de flexibilité et d'adaptabilité face à la complexité grandissante des systèmes industriels. Pour surmonter ces limitations, les méthodes d'analyse de la sécurité basées sur la pensée complexe apparaissent comme une solution prometteuse, offrant une vision plus globale pour évaluer les risques. Cette orientation vers une gestion de la sécurité fondée sur une approche systémique et complexe répond à l'évolution et à l'incertitude des risques industriels contemporains (Adriaensen et al., 2019; Salmon et al., 2020). L'évolution des enjeux liés à l'Industrie 4.0 nécessite des méthodes d'analyse de la sécurité capables de traiter les défis des systèmes de travail modernes, en particulier ceux permettant d'analyser la dynamique des interactions complexes (Dekker et al., 2011).

Pour pallier les limitations des méthodes traditionnelles d'analyse des risques, l'adoption de nouvelles approches, telles que l'analyse de résonance fonctionnelle (FRAM) et le modèle d'accident et de processus théoriques systémiques (STAMP), est suggérée pour évaluer les risques des systèmes de fabrication complexes (Mofidi Naeini & Nadeau, 2021). Le Tableau 1.20 expose quelques approches de gestion des risques de SST basées sur la pensée complexe.

Tableau 1.20 Approches de gestion des risques basées sur la pensée complexe

Approche	Concept	Références
STAMP	<p>L'approche STAMP adopte une perspective systémique de la sécurité des systèmes. Elle met l'accent sur le contrôle plutôt que sur la simple prévention des défaillances. STAMP interprète les accidents comme étant le produit des interactions complexes entre les divers éléments du système, plutôt que comme des défaillances isolées, contrairement aux approches traditionnelles qui associent la sécurité à la fiabilité. Cette approche vise à garantir la sécurité en maintenant des contraintes appropriées dans le système, en examinant les causes des accidents par l'identification des failles de contrôle. Elle recourt à des outils tels que les diagrammes de contrôle afin de représenter les mécanismes de rétroaction et les relations de contrôle, ce qui permet une meilleure identification et une atténuation des risques dans les environnements complexes.</p>	(Qiao et al., 2019), (Bjerga et al., 2016), (Zhang et al., 2022).
FRAM	<p>L'approche FRAM offre un cadre systémique pour analyser les interactions non linéaires entre les différentes fonctions d'un système. En prenant en compte la variabilité fonctionnelle et les écarts par rapport aux performances prévues, plutôt que de se focaliser sur les éléments individuels, FRAM examine les activités habituelles du système. Cette approche souligne comment la variabilité des performances peut engendrer des résonances entre les fonctions, conduisant à des événements indésirables. FRAM permet d'évaluer la résilience des systèmes complexes, fournissant ainsi des éléments pour concevoir des systèmes résistants et plus adaptatifs, en analysant les fonctions, leurs interdépendances et les différents effets de leur variabilité.</p>	(Hollnagel, 2016), (Patriarca et al., 2020), (Salehi et al., 2021), (Adriaensen et al., 2019).

Ces approches proposent des perspectives variées, mais complémentaires pour examiner et renforcer la sécurité ainsi que la résilience dans des environnements complexes. En raison des résultats obtenus avec l'application de FRAM et STAMP, ainsi que de la complexité des systèmes de fabrication analysés, ces deux approches sont jugées les plus adaptées pour l'analyse des risques. De plus, avec l'intégration de l'Industrie 4.0 dans le secteur de la fabrication, les interconnexions et la complexité des systèmes vont nécessairement croître. Il est donc probable que l'introduction de nouvelles technologies entraîne des changements dans le positionnement des secteurs manufacturiers au sein des quadrants. Ces innovations pourraient intensifier les couplages et favoriser des comportements systémiques plus non linéaires et imprévisibles, rendant leur gestion plus complexe (Adriaensen et al., 2019; Hollnagel, 2008).

Diverses études ont démontré que FRAM et STAMP offrent une perspective systémique pour l'analyse des systèmes. En ce qui concerne leurs caractéristiques, ces méthodes pourraient être perçues comme des outils prometteurs pour l'évaluation des risques dans le secteur de la fabrication, particulièrement dans le cadre de l'Industrie 4.0 (Adriaensen et al., 2019; Mofidi Naeini & Nadeau, 2021).

## 2. CHAPITRE 2 : PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE

Ce chapitre met en perspective la problématique et identifie les objectifs de recherche. D'abord, dans la section 2.1, nous cernons les éléments qui forment l'assise de la problématique. Ensuite, dans la section 2.2, nous formulons les questions de recherche qui orienteront le projet. Finalement, dans la section 2.3, nous présentons les objectifs de notre projet de recherche.

### 2.1. Problématique de recherche

La problématique de recherche peut se résumer en quatre éléments fondamentaux. Ces éléments sont issus principalement de la revue de la littérature (voir chapitre 1). Chacun de ces éléments clés est détaillé dans les sections suivantes. La Figure 2.1 illustre les éléments clés de la problématique.

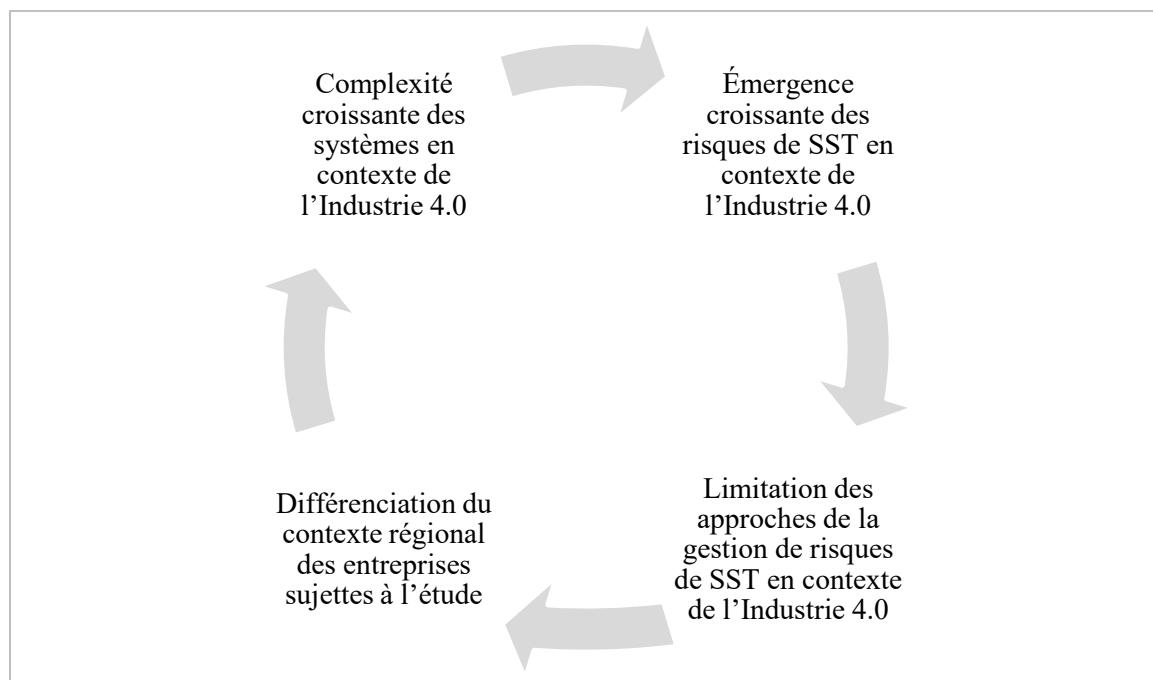


Figure 2.1 Problématique de la recherche

#### 2.1.1. Complexité croissante des systèmes en contexte de l'Industrie 4.0

Les avancées technologiques, marquées par l'émergence du concept d'Industrie 4.0, combinées aux conditions opérationnelles modernes, jouent un rôle central dans l'accroissement de la complexité des systèmes industriels (Komljenovic et al., 2017). Cette complexité se manifeste de manière non linéaire, évoluant selon une dynamique à niveaux multiples, où les interactions

et les interdépendances des éléments du système prennent une importance croissante (Afgan & Veziroglu, 2012). En effet, l'industrie constitue intrinsèquement un système complexe, façonné par une combinaison de facteurs humains, organisationnels et technologiques. Parmi ces facteurs, le comportement humain et l'incertitude occupent une place dominante, illustrant les propriétés émergentes inhérentes à ces environnements (Brocal, González, et al., 2019).

Dans ce contexte, l'intégration des technologies avancées dans la chaîne de valeur des entreprises génère inévitablement des contraintes organisationnelles supplémentaires, remettant en question les pratiques de gestion traditionnelles (Reuter et al., 2017). Les processus industriels, impulsés par des technologies et des méthodes de fabrication de pointe, favorisent un dynamisme sans précédent dans les opérations, tout en amplifiant la complexité des chaînes de production et en créant des environnements de travail plus intelligents et interconnectés (Badri et al., 2018). Cette nouvelle complexité, souvent difficile à anticiper, engendre une opacité accrue au sein des systèmes, où certains risques, autrefois isolés, deviennent systémiques (Komljenovic et al., 2017).

L'augmentation de la complexité liée à l'Industrie 4.0 influence profondément la SST, notamment en ce qui concerne la nature des tâches, les pratiques de gestion et les dimensions organisationnelles. Ces transformations soulignent la nécessité d'adapter des stratégies de gestion des risques pour répondre aux défis posés par ces environnements en mutation constante (Badri et al., 2018).

### **2.1.2. Émergence croissante des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0**

Face aux conditions limites actuelles et futures, il est essentiel de prendre en compte l'émergence de nouveaux risques résultant de la numérisation, de la connectivité et de l'intégration des systèmes cyber-physiques. Il s'agit donc des risques émergents associés à la complexité accrue des systèmes technologiques (Ávila-Gutiérrez et al., 2022).

Le facteur humain constitue le principal point de connexion entre les risques émergents industriels et professionnels dans les processus de fabrication avancés. La complexité croissante des environnements opérationnels et commerciaux entraîne un dépassement des capacités cognitives humaines (Badri et al., 2018).

Les progrès technologiques, tels que l'Industrie 4.0 ont introduit des complexités additionnelles aux défis déjà présents, mettant en évidence l'importance d'analyser le lien possible entre les éléments de l'Industrie 4.0 et la gestion de la SST (Badri et al., 2018). Le manque de normes

ou de mises à jour adéquates en fonction des progrès technologiques peut engendrer des conséquences considérables sur la SST (Fernández & Pérez, 2015).

Si les technologies de l'Industrie 4.0 évoluent de manière isolée et que les initiatives des décideurs en matière de SST sont désorganisées, les risques pourraient augmenter et une partie des avancées obtenues dans la gestion des dangers pourrait être compromise (Badri et al., 2018).

Les impacts de l'Industrie 4.0 sur la SST entraînent à la fois des bénéfices et des défis potentiels, pouvant mener à l'émergence de nouveaux risques. Ces risques incluent tant les risques industriels que les risques professionnels, en raison de leur forte interconnexion (Brocal, González, Reniers, et al., 2018). Les risques émergents liés aux facteurs humains sont classifiés en deux catégories selon leurs conséquences : les risques d'accident et les risques psychosociaux et musculosquelettiques (Brocal, Sebastián, et al., 2019).

L'émergence de l'Industrie 4.0 a entraîné une transformation majeure dans la manière dont la sécurité industrielle est abordée dans les systèmes de travail. Cette nouvelle ère ne se contente pas d'introduire des technologies avancées, elle transforme également les systèmes de travail traditionnels en réseaux fortement interconnectés de technologies, de personnes et d'unités commerciales. L'émergence de l'Industrie 4.0 provoquera une révolution dans les approches de gestion de la sécurité (Kamble et al., 2018).

### **2.1.3. Limitation des approches de la gestion de risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0**

Les industries recourent à des méthodes d'analyse des risques, dont la majorité a été élaborée il y a plus de cinquante ans, et qui demeurent des outils standards pour l'analyse de la sécurité industrielle (Harms-Ringdahl, 2001). Les méthodes ont été conçues en tenant compte de risques associés à des conditions relativement constantes dans le passé. Cependant, les systèmes de travail contemporains sont désormais beaucoup plus complexes et mettent en lumière de nouveaux risques émergents (Fernández & Pérez, 2015).

Une des principales critiques des méthodes traditionnelles d'analyse de la sécurité est leur capacité limitée à traiter uniquement des relations de cause à effet linéaires, ce qui les rend inadaptées pour analyser les comportements complexes ou émergents des systèmes (Waterson et al., 2015). Certaines méthodes traditionnelles ne permettaient pas de montrer de quelle manière l'interaction entre les différents éléments d'un système, y compris les paramètres de

gestion, organisationnels et humains, pouvait conduire à un accident (Underwood & Waterson, 2013).

Les approches actuelles d'évaluation de la sécurité en SST montrent des faiblesses face aux défis des environnements de l'Industrie 4.0. Les méthodes traditionnelles font souvent défaut en termes de flexibilité et d'adaptabilité face à la complexité grandissante des systèmes industriels. Pour surmonter ces limitations, les méthodes d'analyse de la sécurité basées sur la pensée complexe constituent éventuellement des solutions prometteuses, offrant une vision plus globale pour évaluer les risques. Cette orientation vers une gestion de la sécurité fondée sur une approche systémique et complexe répond à l'évolution et à l'incertitude des risques industriels contemporains (Adriaensen et al., 2019).

L'évolution des enjeux liés à l'Industrie 4.0 nécessite des méthodes d'analyse de la sécurité capables de traiter les défis des systèmes de travail modernes, en particulier ceux permettant d'analyser la dynamique des interactions complexes (Dekker et al., 2011).

#### **2.1.4. Différenciation du contexte régional des entreprises sujettes à l'étude**

L'évaluation de la maturité numérique révèle des écarts significatifs entre différentes régions. En fait, l'Europe démarque par une adoption avancée des technologies numériques, car elle est bien soutenue par des stratégies publiques solides et par des moyens financiers substantiels (Brodny & Tutak, 2021; Demikhov et al., 2023). Autrement, le Québec est connu par une progression inégale, avec une avance remarquable des grandes entreprises par rapport aux PME (Bouchard et al., 2022; Caron et al., 2020). Cependant, en Afrique du Nord, bien que des initiatives soient en cours pour réduire le retard, des obstacles ralentissent encore le développement (El Aynaoui et al., 2022; Ghoneim & Mandour, 2023). L'ensemble de ses écarts démontrent le rôle essentiel des politiques gouvernementales, du cadre socio-économique et de l'accès aux ressources dans la transformation numérique des organisations. Renforcer et consolider la collaboration internationale pourrait contribuer à accélérer les progrès technologiques dans les zones les moins développées.

La comparaison souligne des écarts notables dans la gestion de la SST au sein des entreprises québécoises, européennes et nord-africaines. Les entreprises européennes bénéficient d'un cadre réglementaire harmonisé à l'échelle du continent, ce qui leur confère une avance manifeste dans la détection des risques émergents et l'adoption des approches innovantes de gestion des risques (Sakowski & Marcinkiewicz, 2019). Au Québec, certaines entreprises restent sujettes à

des vulnérabilités, même si la SST est encadrée par une organisation dédiée et bien structurée (Champoux & Brun, 2010; Racine, 2021). En Afrique du Nord, le progrès en matière de SST reste restreint à cause de défis et des enjeux structurels et d'un manque de ressources, mais l'intégration croissante de normes internationales ouvre la voie à des perspectives prometteuses (Benali, 2018). Dans cette optique, chaque région se distingue par des atouts et des défis propres, traduisant des priorités diverses et des niveaux de maturité distincts en matière de la prévention des risques professionnels.

### **2.1.5. Synthèse de la problématique**

L'Industrie 4.0 a réussi à augmenter la complexité des systèmes industriels via l'intégration des technologies avancées, ce qui entraîne des interdépendances et des interactions croissantes. Cette révolution a modifié les pratiques de gestion des risques de SST, introduisant ainsi de nouveaux défis liés à la connectivité et à la numérisation. Les risques émergents, influencés par des facteurs technologiques et humains, nécessitent une gestion efficace et adaptée. Cependant, les approches traditionnelles de gestion des risques, principalement linéaires et rigides, ne sont pas largement adaptées à la complexité accrue des systèmes actuels. Ainsi, l'adoption d'approches systémiques, basées sur la pensée complexe, est essentielle afin de faire face aux défis posés par l'Industrie 4.0. Dans cette optique, des écarts régionaux existent dans la maturité numérique et la gestion des risques de SST. L'Europe est en avance par rapport au Québec et à l'Afrique du Nord, soulignant l'importance des ressources et des politiques dans le but de favoriser une transformation numérique maîtrisée et une gestion des risques de SST efficace.

## **2.2. Questions de recherche**

- Quels sont les principaux risques de SST associés à l'intégration des technologies de l'Industrie 4.0 ?
- En quoi les approches traditionnelles de gestion des risques de SST sont-elles inadéquates face aux défis posés par l'Industrie 4.0, et quelles approches innovantes pourraient combler ces lacunes ?
- Comment les différences régionales en matière de transformation numérique influencent-elles la gestion des risques de SST dans les entreprises québécoises, européennes et nord-africaines ?

### **2.3. Objectifs de recherche**

Ce projet comporte un objectif principal et deux objectifs spécifiques.

#### **Objectif principal :**

- Élaboration d'une démarche systématique de gestion des risques de SST adapté aux environnements industriels complexes et interconnectés de l'Industrie 4.0.

#### **Objectifs spécifiques :**

- Identifier les risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0.
- Évaluer la limitation des approches traditionnelles de gestion des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0 et explorer les apports des méthodologies basées sur la pensée complexe en tenant compte des différences régionales en matière de transformation numérique entre les entreprises québécoises, européennes et nord-africaines.

### 3. CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

Il est important de repenser la gestion des risques de SST, surtout dans un contexte marqué par la complexification des environnements industriels induite par la transformation numérique. Ce chapitre propose notre démarche systématique de gestion des risques de SST, conçue pour répondre spécifiquement aux exigences de cette nouvelle réalité industrielle. D'emblée, la section 3.1 décrit généralement les composants qui structurent cette démarche. Ensuite, la section 3.2 expose la phase de la conception tout en définissant la structure théorique de notre démarche. En outre, la section 3.3 présente les différentes modalités de mise en place de notre démarche. Enfin, la section 3.4 propose un outil opérationnel afin de faciliter la mise en œuvre concrète de notre démarche systématique dans les entreprises.

#### **3.1. Démarche systématique de gestion des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0**

Une démarche systématique de gestion des risques de SST est un processus structuré permettant d'identifier, d'analyser, d'évaluer et de traiter des risques afin de bien garantir la sécurité et la santé des travailleurs. Cette démarche prend en compte les enjeux émergents associés aux technologies numériques, à l'interconnexion et à l'automatisation des systèmes de production industriels. Cette approche permet d'anticiper les risques aux environnements de travail automatisés, d'adapter les stratégies de prévention en conséquence, et de garantir des conditions de travail sécurisé et sain dans le cadre de la complexification émergente des systèmes industriels.

Dans le contexte de l'Industrie 4.0, la démarche systématique de gestion des risques de SST se divise en deux volets successifs et complémentaires, telle qu'illustrée par la Figure 3.1. D'une part, le premier volet détaille la conception de cette démarche, en définissant ses fondements théoriques et sa structuration. D'autre part, le second volet concerne son déploiement concret dans un environnement industriel en tenant compte des contraintes liées à la transformation numérique. Ces deux volets indissociables assurent ainsi une gestion des risques de SST à la fois rigoureuse et adaptée aux enjeux actuels de l'Industrie 4.0.

La mise en place de notre démarche s'impose à l'aide d'un outil opérationnel conçu à cet effet. Notre outil permet ainsi de traduire efficacement les modalités théoriques en actions concrètes et adaptées aux réalités industrielles propres à l'Industrie 4.0.

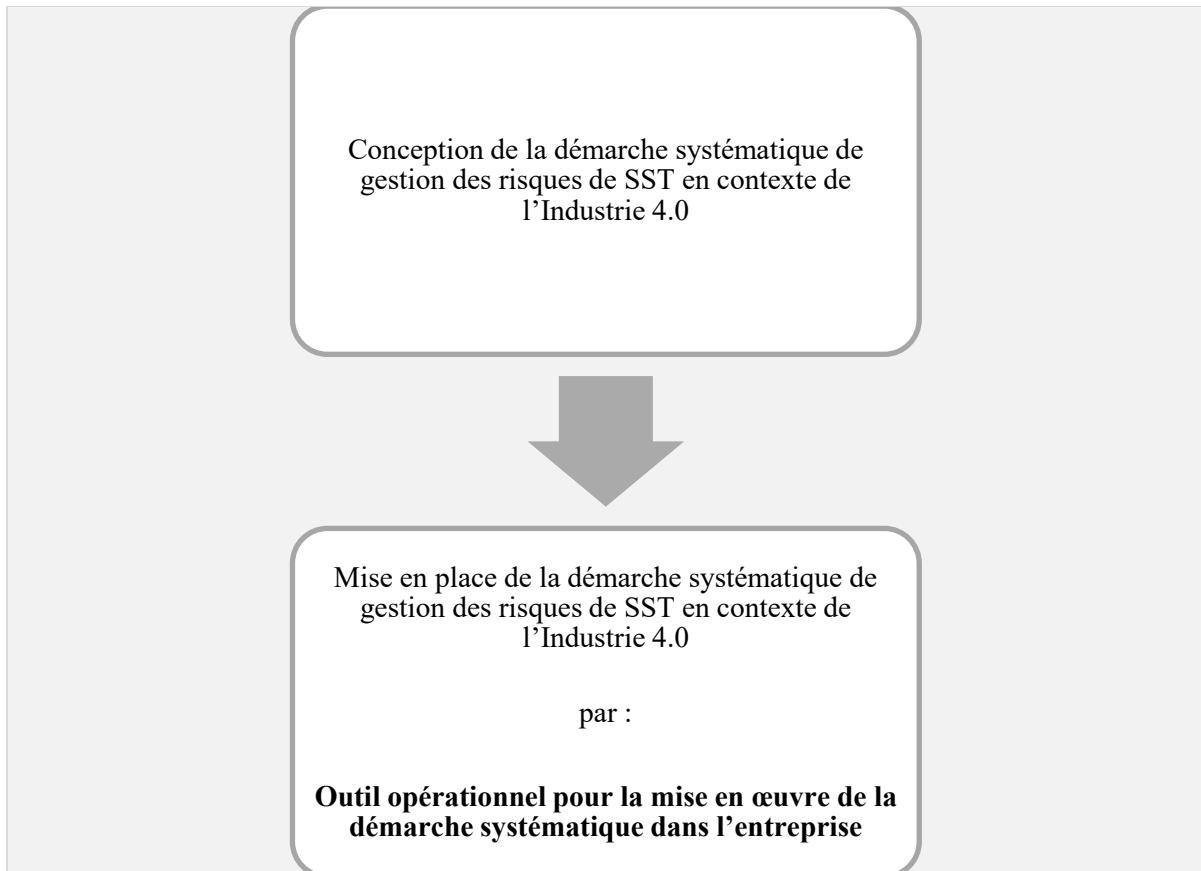


Figure 3.1 Démarche systématique de gestion des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0

### **3.2. Conception de la démarche systématique de gestion des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0**

La conception de notre démarche systématique de gestion des risques de SST s'appuie sur une double approche : théorique et méthodologique. En fait, la section 3.2.1 aborde le processus de développement de la revue de la littérature qui nous permet d'analyser les travaux antérieurs pour identifier les limites des approches traditionnelles et d'introduire les approches de gestion des risques de SST basées sur la pensée complexe. Dans cette optique, la section 3.2.2 introduit la modélisation de la démarche proposée, en définissant son architecture globale dans le but d'assurer sa pertinence et son applicabilité dans les environnements de travail complexes de l'Industrie 4.0.

### 3.2.1. Revue de la littérature

La revue de la littérature vise à établir une compréhension approfondie des approches existantes en matière de gestion des risques de SST dans le contexte de l'Industrie 4.0. Pour ce faire, un processus méthodique a été suivi, structuré en quatre étapes, tel qu'illustré dans la Figure 3.2. La première étape (a) consiste à sélectionner les bases de données scientifiques pertinentes pour garantir l'exhaustivité et la fiabilité des sources. Ensuite, la deuxième étape (b) porte sur l'élaboration d'une stratégie de recherche rigoureuse à partir de mots-clés ciblés. La troisième étape (c) définit les critères d'inclusion et d'exclusion afin d'assurer la pertinence des documents retenus. Enfin, la dernière étape (d) présente l'analyse des publications sélectionnées, en mettant en lumière les principales tendances, limites et apports identifiés dans la littérature.

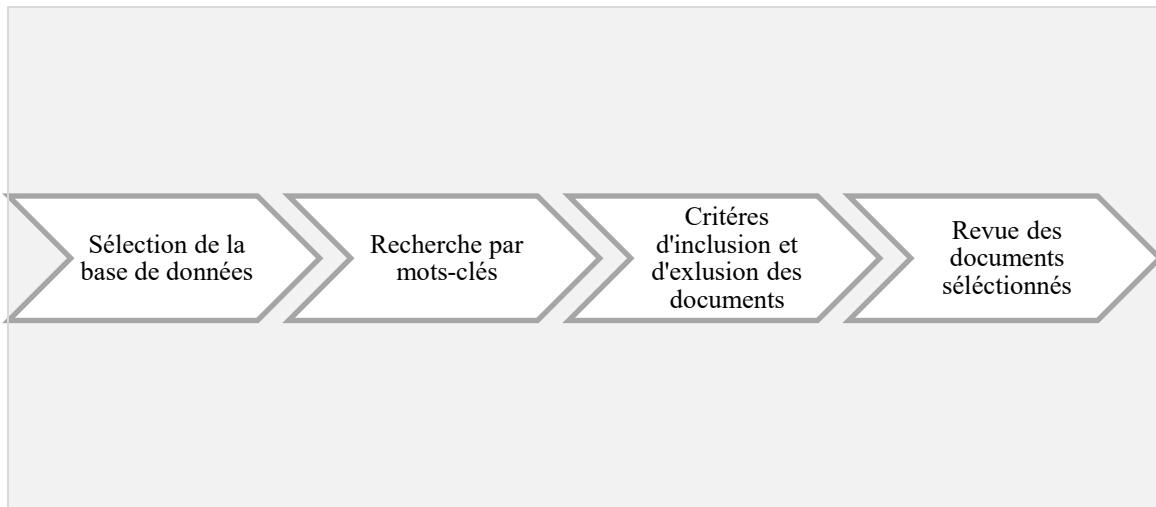


Figure 3.2 Élaboration de la revue de la littérature

#### a) Sélection de la base de données

La recherche a été réalisée en explorant systématiquement toutes les paires potentielles à travers diverses bases de données scientifiques, à savoir Science Direct, Springer et Emerald. Ces plateformes ont été choisies en raison de la qualité élevée des publications qu'elles contiennent et de leur réputation établie. L'exploitation de ces sources prestigieuses permet de garantir une couverture exhaustive des travaux disponibles, tout en assurant la rigueur et la pertinence des informations recueillies pour cette étude. Les recherches ont été menées selon des critères de

sélection rigoureux afin d'identifier les paires pertinentes et de garantir l'exhaustivité ainsi que la représentativité nécessaire pour achever les objectifs de la recherche.

### **b) Recherche par mots-clés**

Dans cette étape, nous avons identifié les mots-clés pertinents pouvant détecter la recherche actuelle en ce qui concerne notre sujet de recherche. De plus, il convient de préciser que nous avons utilisé deux langues (le français et l'anglais) pour mener à bien cette recherche. Ces mots-clés ont été classés en trois catégories :

- Le premier groupe inclut des termes, tels que « système complexe », « transformation numérique », « Industrie 4.0 », « technologies numériques » et « maturité numérique ».
- Le deuxième groupe regroupe les mots liés à la SST, tels que « gestion des risques », « SST », « risque », « risque émergent », « organisationnel » et « humaine ».
- Le troisième groupe présente les mots clés liés aux régions étudiées, tels que « entreprises québécoises », « entreprises européennes », « entreprises nord-africaines », « Québec », « Europe » et « Afrique du Nord ».

Nous avons également utilisé les opérateurs booléens AND et OR dans les termes de recherche pour préciser les relations logiques entre ces trois groupes de mots clés, ce qui a permis d'identifier un nombre initial de 1744 publications.

### **c) Critères d'inclusion et d'exclusion des documents**

Après la phase initiale de recherche, nous avons éliminé les doublons afin de garantir l'unicité des résultats. Par la suite, nous avons évalué la pertinence des études restantes tout en vérifiant l'inclusion des mots-clés essentiels : ceux relatifs au premier groupe, ceux relatifs au deuxième groupe et ceux relatifs au troisième groupe. Cette étape était essentielle pour assurer que les études sélectionnées correspondaient bien aux critères de recherche.

Les études qui ne contenaient pas ces mots-clés dans le résumé ou le titre ont été exclues, car elles ne satisfaisaient pas aux critères de notre sujet de recherche. Cette sélection a permis de se focaliser notre attention uniquement sur les travaux les plus pertinents.

Les types de publications retenues comprenaient principalement des articles scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture, des communications dans des actes de conférences évaluées par les pairs, ainsi que quelques chapitres de livres issus d'ouvrages spécialisés et reconnus dans le domaine.

Enfin, parmi les études ayant franchi cette première évaluation, nous avons appliqué un dernier filtre en fonction de la plateforme de publication. Cette étape visait à vérifier et assurer que les études retenues étaient publiées sur des plateformes crédibles ou dans des revues, assurant ainsi la qualité et la crédibilité des informations utilisées dans cette analyse. Au terme de ce processus, un total de 196 publications a été retenu.

#### **d) Revue des documents sélectionnés**

Nous avons procédé à une analyse approfondie de toutes les études sélectionnées. Chaque étude a été minutieusement évaluée pour en examiner la pertinence, la qualité et les conclusions. Cette étape cruciale a permis la comparaison des données, l'identification des tendances émergentes et la vérification de la robustesse des méthodologies utilisées. L'objectif était de s'assurer la fiabilité des informations collectées et d'approfondir notre compréhension du sujet. Les résultats de cette analyse exhaustive ont fourni une base solide pour les étapes suivantes de notre recherche, offrant ainsi des perspectives claires pour des recommandations futures.

Le processus établi pour la sélection des publications, illustré dans la Figure 3.3, a commencé par une recherche dans les bases de données scientifiques, à l'aide de mots-clés, ce qui a permis de repérer 1744 documents. Après une phase de tri, nous avons exclu 1613 publications, dont 1518 publications ont été jugées non pertinentes, 86 publications ont été identifiées comme des doublons, et 9 publications ont appartenu à la littérature grise. Finalement, 131 publications ont été retenues comme pertinentes. 39 publications citées dans les documents analysés ont été ajoutées à celles-ci. 26 publications additionnelles portant sur les définitions et les concepts ont été intégrées, menant donc à une sélection finale de 196 publications utilisées pour notre l'étude.

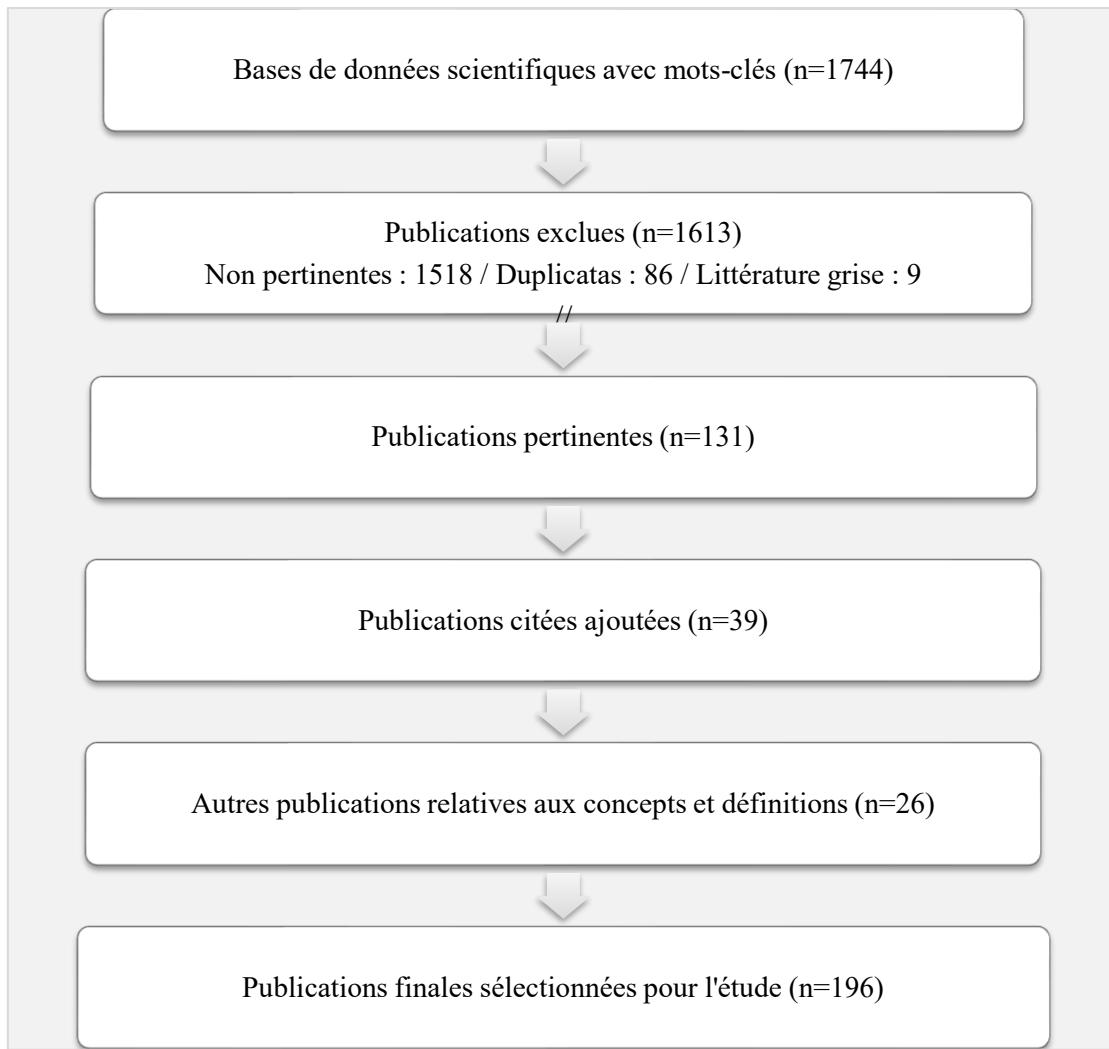


Figure 3.3 Sources pour élaborer la revue de la littérature

### **3.2.2. Modélisation de la démarche systématique de gestion des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0**

La revue de la littérature nous a permis d'identifier les limites des approches traditionnelles de gestion des risques de SST et de bien cerner les exigences émergentes à l'ère de l'Industrie 4.0. Dans cette optique, nous avons adapté une modélisation afin de mieux répondre aux défis posés. Cette section propose ainsi une démarche systématique bien construite en des étapes, tout en tenant compte de ces constats :

- L'identification des composants humains, organisationnels, technologiques et environnementaux du système.

- L'identification et l'évaluation des risques dans le système.
- Orientation stratégique de l'analyse des risques.
- La mise en place de mesures de contrôle et d'atténuation des risques.
- Le suivi et la réévaluation continu afin de maintenir l'efficacité du système.

Cette démarche intégrée permettra d'assurer une gestion adaptative et proactive des risques, au sein des milieux industriels complexes et en constante évolution.

### **3.3. Mise en place de la démarche systématique de gestion des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0**

La conception de la démarche a permis de définir l'architecture de la démarche systématique adaptée aux spécificités de l'Industrie 4.0. D'où, il s'agit maintenant de traduire cette conception en actions concrètes. Cette partie présente les modalités de mise en œuvre de notre démarche sur le terrain :

- Choix du notre terrain d'application (industrie, entreprise) : opter pour un contexte emblématique de l'Industrie 4.0 permet de cibler les défis spécifiques associés à l'intégration des technologies émergentes dans la gestion des risques de SST.
- Identification des éléments du système : repérer les composants humains, techniques, environnementaux et organisationnels afin d'assimiler les interactions clés au fonctionnement du système.
- Identification et évaluation des risques : identifier et analyser les risques spécifiquement en SST en fonction du contexte organisationnel et technologique choisi.
- Orientation stratégique de l'analyse des risques : guider l'utilisateur dans le choix de la méthode d'analyse la plus pertinente selon la complexité et la nature du risque. Une logique conditionnelle permet de recommander une approche appropriée, tout en offrant la possibilité de l'ajuster en fonction du contexte spécifique de l'entreprise.
- Mise en place des mesures de contrôle : proposer des actions préventives, correctives et organisationnelles afin de modérer ou atténuer l'impact des risques déjà identifiés.
- Suivi et réévaluation continue : mettre en place un processus de suivi et de révision afin d'adapter en continu les mesures de gestion aux évolutions du système.

### **3.4. Outil opérationnel pour la mise en œuvre de la démarche systématique dans l'entreprise**

Une fois la démarche systématique de gestion des risques de SST, soit conçue, et ses modalités de mise en œuvre sont définies, il devient crucial de suggérer une application concrète et utilisable sur le terrain. Ainsi, un outil opérationnel est élaboré sous Excel pour soutenir son déploiement en contexte industriel.

L'outil opérationnel développé sous Excel vise à rendre concrètement applicable la démarche systématique de gestion des risques de SST en entreprise. Notre outil est structuré en six modules interconnectés. Il couvre toutes les étapes clés : les données générales, la cartographie du système, l'identification et l'évaluation des risques, le choix méthodologique de l'approche de gestion des risques, les mesures correctives et le suivi. Chaque module permet une analyse approfondie et interactive grâce à des liaisons automatiques et des calculs intégrés. Sur cette base, l'outil oriente vers des méthodes d'analyse adaptées selon la nature et la complexité des risques. Il propose aussi un suivi structuré des actions et des audits. Cet outil, évolutif et flexible, permet d'adapter à divers contextes industriels.

Ce chapitre a présenté la méthodologie adoptée pour concevoir et déployer une démarche systématique de gestion des risques de SST dans le contexte de l'Industrie 4.0. À partir d'une base théorique solide grâce à une revue de la littérature, la démarche a été modélisée. Ensuite, la démarche est structurée par un processus de sa mise en œuvre en contexte réel à travers une étude de cas. Sur cette base, un outil opérationnel a été proposé afin d'en faciliter la mise en place concrète de la démarche au sein de l'entreprise.

## 4. CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre présente l'application concrète de la démarche systématique de gestion des risques de SST à travers une présence sur le terrain en milieu industriel. Il vise à valider l'opérationnalité et la pertinence de la démarche dans un contexte réel, marqué par les spécificités de l'Industrie 4.0. D'emblée, la section 4.1 détaille la modélisation de la démarche. Ensuite, la section 4.2 décrit les modalités de mise en œuvre de cette démarche sur terrain, en abordant les étapes suivies. En outre, la section 4.3 expose l'outil opérationnel élaboré pour faciliter l'implémentation de la démarche dans l'entreprise. Enfin, la section 4.4 présente les atouts et les inconvénients de cette démarche.

### **4.1. Modélisation de la démarche systématique de gestion des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0**

La revue de la littérature présentée dans cette partie a permis d'identifier les fondements théoriques. Elle nous a permis de dégager les limites des approches traditionnelles en matière de gestion des risques de SST dans le contexte de l'Industrie 4.0 et de repérer les méthodes de gestion des risques basés sur la pensée complexe. En effet, cette analyse a souligné la nécessité d'adopter une démarche adaptée à la complexité croissante des environnements de travail modernes. Sur cette base, cette partie propose une modélisation de la démarche systématique.

Une fois la revue de la littérature réalisée, il devient primordial de définir les étapes clés, illustrées dans la Figure 4.1, pour concevoir la démarche systématique de gestion des risques de SST. La démarche inclut :

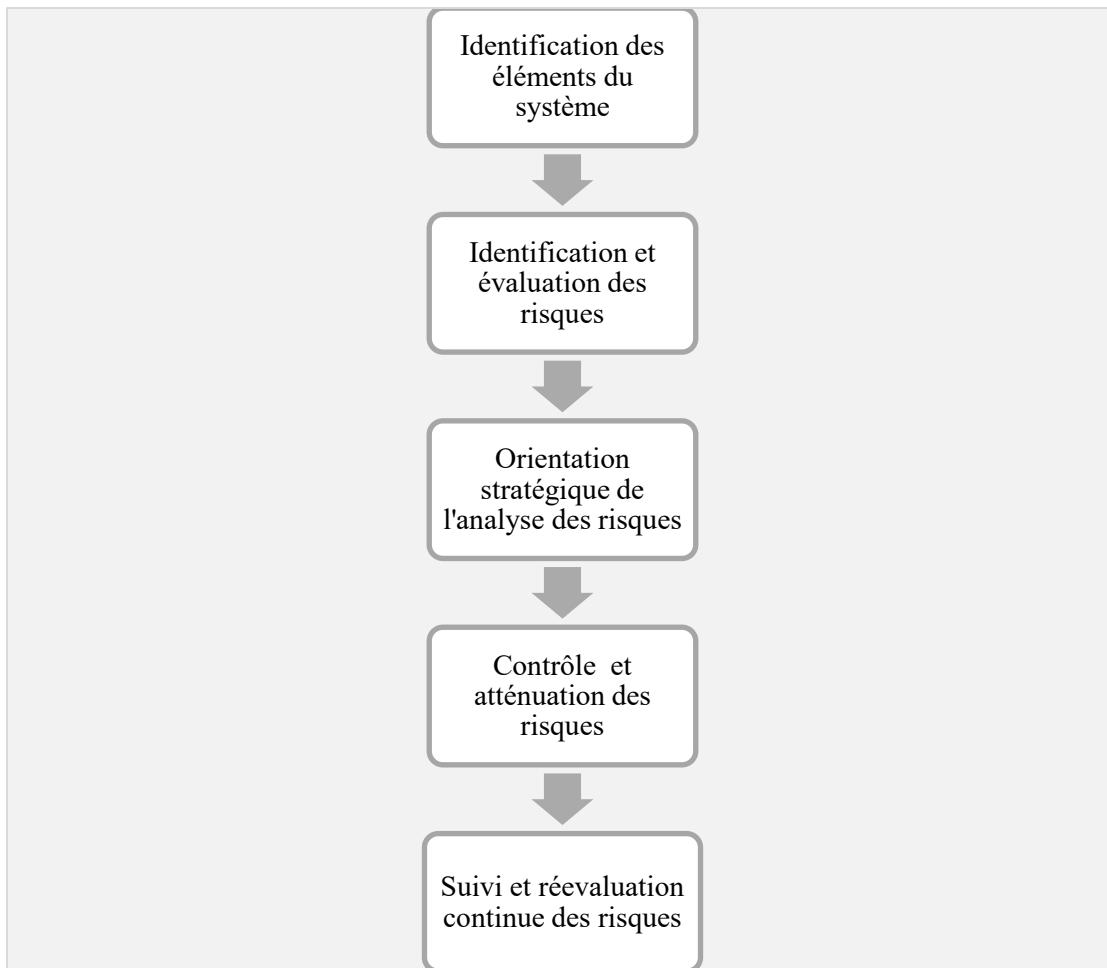


Figure 4.1 Modélisation de la démarche systématique

- **Identification des éléments du système**

Repérer les composants humains, organisationnels, environnementaux et technologiques interconnectés dans le système industriel.

- **Identification et évaluation des risques**

Identifier et évaluer les risques liés à la SST dans un environnement technologique complexe et interconnecté.

- **Orientation stratégique de l'analyse des risques**

L'orientation stratégique de l'analyse des risques aide l'utilisateur à sélectionner la méthode d'analyse la mieux adaptée selon la complexité et la nature du risque. Une logique conditionnelle permet de recommander une approche, tout en offrant à l'utilisateur la possibilité de l'ajuster en fonction du contexte spécifique étudié.

- **Contrôle et atténuation des risques**

Mettre en place des mesures et des politiques pour maîtriser et réduire les risques identifiés de manière proactive.

- **Suivi et réévaluation continue des risques**

Surveiller et ajuster d'une façon continue les stratégies de gestion des risques de SST tout en prenant en compte l'évolution de la technologie.

## **4.2. Mise en place de la démarche systématique de gestion des risques de SST en contexte de l'Industrie 4.0**

La modélisation présentée précédemment a permis de structurer les éléments clés de la démarche systématique de gestion des risques de SST. Afin de rendre cette démarche concrète et applicable en pratique, cette partie s'attarde sur les modalités concrètes de sa mise en œuvre. Elle vise à détailler les étapes, les conditions et les outils nécessaires pour son déploiement effectif sur terrain.

### **4.2.1. Choix de l'entreprise ou du secteur d'application**

La démarche systématique de gestion des risques de SST à mettre en place doit être adaptée au secteur d'activité de l'entreprise. En effet, les risques varient selon la nature des technologies employées, l'organisation interne et les processus de production. Alors, il est important de sélectionner et définir l'entreprise ou bien le secteur choisi pour une étude de cas. Dans cette optique, l'entreprise sélectionnée doit donc refléter un environnement industriel complexe où les principes de l'Industrie 4.0 sont déjà en cours d'intégration ou en voie de l'être. Une entreprise de fabrication, qui utilise des machines connectées, de l'IA, des robots collaboratifs, ou de la RV, est un exemple. Le choix nous permettra de mieux contextualiser les risques spécifiques à ce type d'environnement complexe et de mettre en lumière les défis liés à l'intégration de technologies de l'Industrie 4.0 dans les SGSST.

### **4.2.2. Identification des éléments du système**

Comprendre les différents composants du système dans un environnement industriel interconnecté constitue l'étape initiale. De ce fait, il est primordial d'identifier toutes les parties prenantes et repérer les éléments techniques, organisationnels, environnementaux et humains

interconnectés. Cela permettra de mieux définir les responsabilités de chacun et d'assimiler les différentes interactions entre les composants du système, ainsi, nous pouvons établir une vision globale de la gestion des risques de SST en contexte l'Industrie 4.0.

- Composants techniques : identifier les machines, les équipements et les systèmes utilisés dans le cadre de l'Industrie 4.0.
- Composants organisationnels : cartographier les protocoles de sécurité en place, les processus de travail et les hiérarchies décisionnelles.
- Composants humains : définir les responsables sécurité, les rôles des travailleurs, les managers, ainsi que les diverses communications entre eux.
- Composants environnementaux : considérer les conditions physiques du travail, l'aménagement des postes, ainsi que l'environnement immédiat pouvant influencer la santé ou la sécurité des travailleurs.

Notre objectif dans cette étape est de mieux assimiler les éléments qui constituent le système afin de mieux appréhender l'impact des risques et de détecter les zones les plus vulnérables.

#### **4.2.3. Identification et évaluation des risques**

Une fois les éléments du système sont repérés, nous passons à analyser des risques spécifiques à la SST. Cette étape comporte l'identification des risques potentiels (organisationnels, physiques ou comportementaux). Il s'agit donc d'évaluer les dangers qui peuvent découler de la combinaison de facteurs techniques, humains, environnementaux et organisationnels.

- Identification des risques : repérer les risques potentiels en termes de SST, par exemple, les risques d'accident physiques, les risques ergonomiques, les risques technologiques, les risques psychosociaux, etc.
- Évaluation des risques : une fois les risques sont bien identifiés, il est important de les évaluer en fonction de leur gravité et de leur probabilité d'occurrence.

#### **4.2.4. Orientation stratégique de l'analyse des risques**

Cette étape a pour objectif d'orienter l'utilisateur vers la méthode d'analyse des risques de SST la plus adaptée en fonction de la nature et du niveau de chaque risque repéré.

- Pour un risque traditionnel de faible complexité, les méthodes traditionnelles comme l'AMDEC ou l'arbre des causes sont appropriées.
- Pour un risque émergent de complexité moyenne ou élevée, les approches traditionnelles demeurent limitées. Il devient nécessaire de recourir à des méthodes basées sur la pensée complexe, comme le FRAM ou le STAMP.
- Dans les situations spécifiques, il peut être pertinent de recourir à des approches hybrides combinant des approches classiques et des approches issues de la pensée systémique.

Une logique conditionnelle permet de recommander une méthode, tout en offrant à l'utilisateur la possibilité d'ajuster ou de justifier son choix selon le contexte spécifique.

#### **4.2.5. Mise en place de mesures de contrôle et d'atténuation des risques**

Après l'identification et l'évaluation des risques, ainsi que les limites des approches traditionnelles, nous pouvons passer à mettre en place des mesures de contrôle afin de modérer ou minimiser l'impact des risques identifiés. Ces mesures doivent être adaptées aux divers types de risques tout en intégrant les principes de prévention.

- **Mesures préventives** : mettre en œuvre des actions afin de minimiser ou éliminer les risques à la source (modification des processus, amélioration des conditions de travail, etc.).
- **Mesures correctives** : si un risque ne peut être totalement éliminé, nous avons besoin de mettre en place des mesures correctives afin de limiter les conséquences (amélioration de l'équipement de protection individuelle, formations à la sécurité, etc.).
- **Mesures organisationnelles** : adapter l'organisation du travail, les flux de travail et la planification organisationnelle pour réduire les risques liés à l'épuisement des travailleurs ou à la surcharge de travail.

#### **4.2.6. Suivi, audit et réévaluation continue des risques**

Cette étape concerne la mise en place d'un processus de suivi continu des risques. L'Industrie 4.0 est en toujours en constante évolution. Donc, les risques doivent être réévalués régulièrement. Il est donc nécessaire de prévoir des audits réguliers afin de vérifier l'efficacité

des mesures mises en place et ajuster la démarche systématique en fonction des nouveaux risques identifiés et évalués.

- **Suivi des performances en SST** : gérer les indicateurs de performance afin de mesurer l'efficacité des mesures de prévention et d'atténuation des risques, par exemple le taux de conformité aux procédures, les taux d'accidents, la satisfaction des travailleurs en matière de SST.
- **Réévaluation des risques** : effectuer des revues régulières des risques pour adapter les stratégies de gestion en fonction des conditions du travail et des évolutions du système industriel.

L'implantation de la démarche systématique constitue une phase essentielle permettant d'ancrer le modèle élaboré. Cependant, il est nécessaire de créer un outil opérationnel pour assurer sa pérennité sur le terrain et son application efficace.

#### **4.3. Outil opérationnel pour la mise en œuvre de la démarche systématique dans l'entreprise**

Une fois les modalités de mise en place de la démarche systématique de gestion des risques de SST établies, il est crucial de concrétiser cette démarche en un outil sur le terrain. Cette partie présente ainsi l'outil destiné à appuyer les entreprises dans le déploiement de la démarche.

L'outil est structuré en plusieurs feuilles Excel de calcul interconnectées, correspondant aux différentes étapes de la démarche comme indiqué dans la Figure 4.2.

##### **Fonctionnalités intégrées :**

- **Liaisons dynamiques entre feuilles** : Les données saisies dans une feuille sont automatiquement répercutées dans les autres feuilles concernées, garantissant un gain de temps et une cohérence.
- **Calculs automatisés** : des formules intégrées pour des fonctionnalités dans chaque feuille.

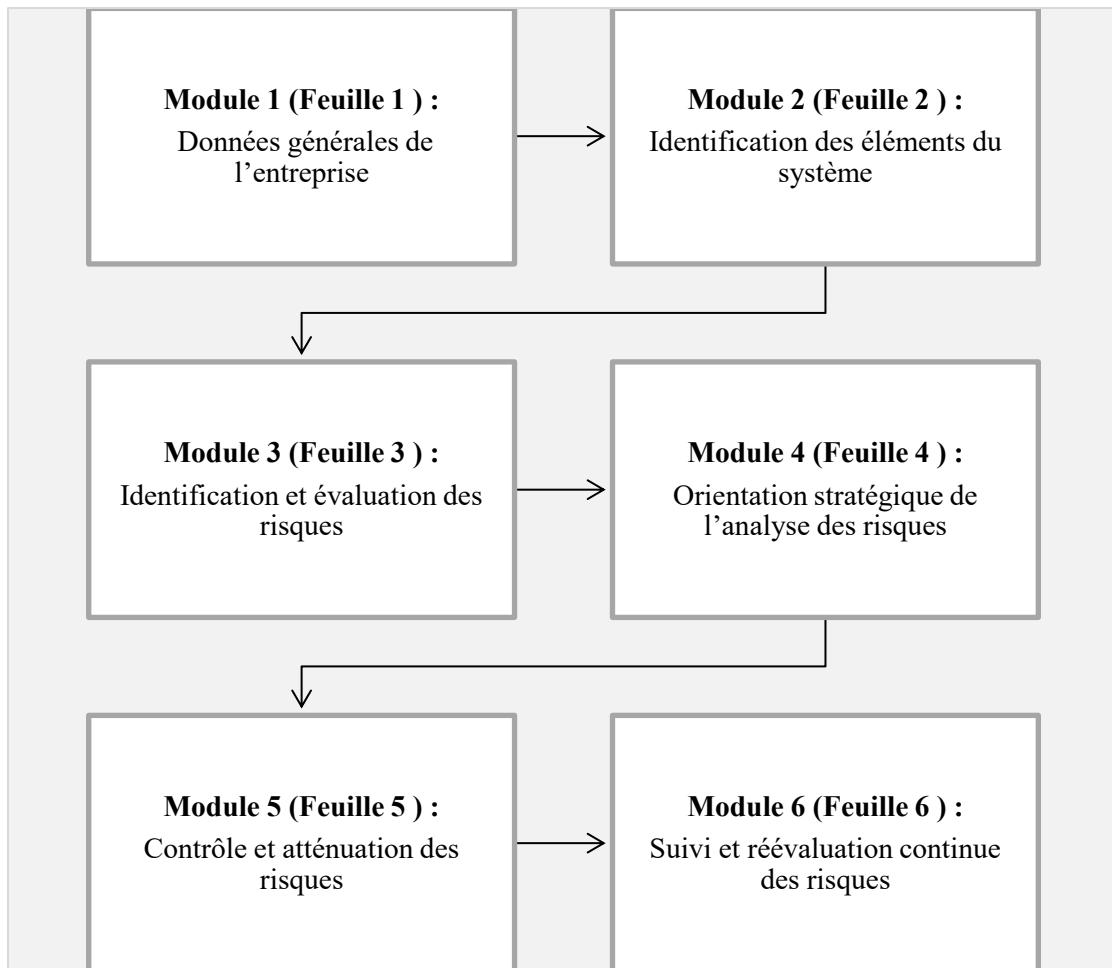


Figure 4.2 Outil opérationnel pour la mise en œuvre de la démarche systématique dans l'entreprise

#### 4.3.1. Module 1 : Données générales de l'entreprise

Ce module regroupe les informations générales sur l'entreprise afin de poser le cadre de l'analyse des risques de SST. Il permet de mieux assimiler le contexte organisationnel, réglementaire et technologique dans lequel la démarche s'inscrit. Le Tableau 4.1 énumère les données générales de l'entreprise.

Tableau 4.1 Données générales de l'entreprise

Catégorie	Renseignements	Indications
Entreprise	Nom	Raison sociale officielle
	Secteur d'activité	Industrie manufacturière, logistique, services, etc.
	Adresse	Adresse complète incluant ville et pays
	Date de création	Année, date exacte, etc.
Taille et structure	Nombre total des employés	Tout personnel (temps plein, temps partiel)
	Nombre de sites	Usines, entrepôts, bureaux, etc.
	Organigramme	Analyse des responsabilités
SST	Responsables SST	Noms, fonctions, etc.
	Comité SST	Composition (s'il existe)
	Réunions SST	Fréquence : mensuelle, trimestrielle, etc.
	Historique des accidents et des incidents	Nombre d'événements majeurs, taux de fréquence, gravité (5 dernières années)
Maturité numérique	Niveau de numérisation	Faible, intermédiaire, élevé (autoévaluation / grille standardisée)
	Technologies de l'Industrie 4.0	IoT, robots collaboratifs, IA, RV, etc.
	Systèmes de gestion intégrés	Indiquer les logiciels utilisés
Réglementation et normes	Normes SST appliquées	ISO 45001, CSA Z1000, etc.
	Obligations légales	Lois particulières, règlements locaux, etc.
Parties prenantes internes/externes	Parties prenantes principales SST	Employés, syndicats, sous-traitants, assureurs, etc.
	Implication des parties prenantes	Autoévaluation du niveau d'implantation (élévé/moyen/faible)

### 4.3.2. Module 2 : Identification des éléments du système

Ce module permet de recenser les composantes du système de travail réparties en quatre grandes catégories : humaine, organisationnelle, technologique et environnementale. Cette cartographie favorise une analyse interconnectée et globale des sources potentielles de risques en contexte de l’Industrie 4.0. Le Tableau 4.2 présente les éléments du système à identifier.

Tableau 4.2 Identification des éléments du système

Élément	Sous élément	Renseignements	Indications
Humain	Superviseurs, techniciens, opérateurs, etc.	Fonctions, anciennetés, leurs états état de SST, etc.	Se focaliser sur les facteurs humains influençant la SST
	Tâches	Opérations réalisées par les travailleurs	Identifier les tâches critiques et les sources de fatigue
Organisationnel	Structure hiérarchique, et répartition des rôles	Organisation interne et relations fonctionnelles	Évaluer clairement les responsabilités et la communication
	Procédures SST	Mesures et politiques en SST, fréquence de mise à jour, implication de la direction, etc.	Vérifier l’applicabilité réelle des procédures et leur pertinence
	Modes d’organisation du travail	Horaires, télétravail, rotations, cadence, etc.	Repérer les contraintes organisationnelles associées aux risques

Tableau 4.2 Identification des éléments du système (suite)

Élément	Sous élément	Renseignements	Indications
Technologique	Machines, systèmes automatisés, outils, etc.	Liste des équipements et des technologies employées	Révélérer le niveau d'automatisation et étudier les interactions homme-machine
	Systèmes numériques	Outils numériques en place et leur fonction (programmiciels de gestion intégrée, capteurs, IoT, etc.)	Dégager les atouts et les limites de la numérisation en SST
Environnemental	Conditions physiques	Bruit, éclairage, température, ventilation, etc.	Identifier les facteurs pouvant affecter la santé et la sécurité des travailleurs
	Lieux du travail	Description des zones de travail (aménagement de l'espace, circulation, signalisation)	Évaluer la conformité et la sécurité des lieux
	Produits et substances	Matières premières, produits semi-finis, produits finis, substances dangereuses, etc.	Observer les dangers chimiques et biologiques

### 4.3.3. Module 3 : Identification et évaluation des risques

Le module 3 permet de structurer le processus d'identification et d'évaluation des risques en SST tout en tenant compte de la complexité des systèmes industriels actuels. Il contient quatre étapes principales : l'identification des risques liés aux différentes composantes du système, leur classification selon leur nature (traditionnel, croissant ou nouveau), l'évaluation de leur fréquence et de leur gravité afin d'en estimer la criticité, puis leur reclassification en fonction de cette criticité afin de cibler les priorités d'intervention et hiérarchiser les actions à entreprendre. Le Tableau 4.3 illustre les différentes étapes pour l'identification et l'évaluation des risques.

Tableau 4.3 Étapes pour identification et évaluation des risques

Étape	Description
Identification des risques	Repérer les risques liés à chaque composante du système (humain, organisationnel, technologique, environnemental)
Classification des risques	Classifier les risques selon les conditions d'émergence ou d'expansion (nouveau, croissant, traditionnel)
Évaluation des risques	Évaluer la fréquence et la gravité de chaque risque pour calculer sa criticité
Reclassification selon la criticité	Reclasser les risques dans chaque catégorie selon leur criticité calculée

Le Tableau 4.4 indique les risques à identifier.

Tableau 4.4 Risques à identifier

<b>Composante</b>	<b>Identification des risques</b>
Humain	Identifier les conditions de travail, les erreurs humaines, les interactions homme machine, etc.
Organisationnel	Repérer les défaillances dans les processus, les manques dans l'organisation, les changements dans la gestion du travail, etc.
Technologique	Identifier l'impact de nouvelles technologies, les défaillances des équipements avancées, les pannes des systèmes automatisés, etc.
Environnemental	Repérer les risques associés à l'environnement du travail, comme le bruit, la température, la qualité de l'air, etc.

Le Tableau 4.5 présente les critères de classification des risques.

Tableau 4.5 Critères de classification des risques

<b>Code</b>	<b>Catégorie</b>	<b>Description</b>
C1	Nouvelle variable technologique ou organisationnelle	Risque lié à des changements dans l'organisation du travail ou/et à l'introduction de nouvelles technologies
C2	Nouvelle perception sociale	Risque associé à un changement dans les attentes ou/et la perception sociale par rapport aux conditions de travail
C3	Nouvelle connaissance scientifique	Risque lié aux découvertes scientifiques récentes qui révèlent de nouveaux dangers pour la santé et/ou la sécurité
C4	Augmentation du nombre de sources de risque	Risque dû à l'augmentation du nombre de sources de risques
C5	Augmentation de la probabilité d'exposition	Risque associé à une augmentation de la probabilité d'exposition aux dangers repérés
C6	Augmentation des conséquences pour la santé	Risque basé sur l'augmentation des conséquences néfastes pour la santé des travailleurs

Le Tableau 4.6 montre les catégories des risques.

Tableau 4.6 Catégories des risques

<b>Catégorie de risque</b>		<b>Critères requis</b>	<b>Description</b>
Risque traditionnel		Aucun critère spécifique	Risque est connu, documenté, stable dans le temps et des mesures de prévention et/ou de contrôle sont déjà établies pour lequel.
Risque émergent	Risque nouveau	C1, C2, C3	Un risque est qualifié comme un risque nouveau lorsqu'il répond au minimum à un des trois critères : C1 et/ou C2 et/ou C3.
	Risque croissant	C4, C5, C6	Un risque est considéré comme un risque croissant lorsqu'il répond au minimum à un des trois critères : C4 et/ou C5 et/ou C6.

Le Tableau 4.7 présente le principe d'évaluation des risques.

Tableau 4.7 Principe d'évaluation des risques

<b>Critère</b>	<b>Évaluation</b>
Fréquence	La fréquence auquel un risque se manifeste ou pourrait se manifester
Gravité	L'impact potentiel du risque sur la santé, la sécurité ou l'environnement
Criticité	La criticité est une mesure, combinant la gravité et la probabilité d'un risque pour en déterminer le niveau de criticité Criticité = Fréquence * Gravité

Le Tableau 4.8 résume le processus d'identification des risques.

Tableau 4.8 Processus d'identification et d'évaluation des risques

Risques	Catégorie des risques		Critères de classification des risques	Évaluation des risques
Humain Organisationnel Technologique Environnemental	Risque traditionnel		Aucun critère spécifique	Criticité élevée Criticité moyenne Criticité faible
	Risque émergent	Risque nouveau	C1, C2, C3	Criticité élevée Criticité moyenne Criticité faible
				Criticité élevée Criticité moyenne Criticité faible
		Risque croissant		Criticité élevée Criticité moyenne Criticité faible

#### 4.3.4. Module 4 : Orientation stratégique de l'analyse des risques

L'orientation stratégique retenue pour l'analyse des risques varie selon la nature des risques identifiés. Les risques traditionnels peuvent être efficacement traités à l'aide de méthodes classiques. Les risques émergents nécessitent une approche fondée sur la pensée complexe ou une combinaison d'outils traditionnels et systémiques. Il convient de souligner que les approches conventionnelles révèlent des limites importantes face aux risques émergents. Les méthodes conventionnelles ne parviennent pas à saisir pleinement les dimensions incertaines, diffuses et évolutives. Le Tableau 4.9 détaille le processus d'orientation stratégique de l'analyse des risques.

Tableau 4.9 Orientation stratégique de l'analyse des risques

Catégorie de risque	Orientation stratégique	Approches de gestion des risques	Contexte d'application
Risques traditionnels	Approches traditionnelles	- Arbre des causes - AMDE - Matrice de criticité ...	- Systèmes simples ou stables - Risques à causalité linéaire, connus et maîtrisable
Risques émergents	Approche basée sur la pensée complexe ou approche hybride (combinaison entre approche simple et approche systémique)	- FRAM - STAMP - Combinaison des outils classiques et systémiques	- Systèmes complexes ou en transition numérique - Risques évolutifs et incertains - Les approches traditionnelles sont inadéquates, puisqu'elles ne prennent pas en considération l'incertitude et l'aspect non linéaire des systèmes complexes

#### 4.3.5. Module 5 : Contrôle et atténuation des risques

Ce module vise à garantir un suivi rigoureux des mesures adoptées afin de maîtriser les risques identifiés. Il permet de consigner les actions préventives et correctives associées à chaque risque, d'assigner les responsables, de fixer des échéances, et de suivre l'avancement de chaque action. Il facilite ainsi l'amélioration continue en matière de SST. Le Tableau 4.10 détaille le processus de contrôle et d'atténuation des risques.

Tableau 4.10 Contrôle et atténuation des risques

Élément	Définition
Identifiant risque	Identifiant unique attribué à chaque risque pour en faciliter le suivi
Description du risque	Description du risque repéré
Type de l'action	Nature de l'action prévue : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Action préventive (éviter le risque)</li> <li>- Action corrective (réduire ou éliminer un risque existant)</li> </ul>
Description de l'action	Détails de la mesure à adopter pour maîtriser le risque
Responsable	Responsable ou chargé de l'implémentation de l'action
Échéance	Date limite prévue pour la réalisation de l'action
État d'avancement	Statut de progression de l'action (non commencée, en cours, achevé, etc.)
Commentaires	Informations additionnelles expliquant les choix, les retards, et les résultats liés à l'action

#### 4.3.6. Module 6 : Suivi et réévaluation continue des risques

Il vise à assurer un suivi régulier et une réévaluation continue des risques détectés. Il comprend le suivi des indicateurs de performance clés, la planification des audits internes en SST et mettre des champs d'ajustements nécessaires pour documenter l'évolution des risques et l'efficacité des actions mises en place. Le Tableau 4.11 détaille le processus de suivi et de réévaluation continue des risques.

Tableau 4.11 Suivi et réévaluation continue des risques

Élément	Définition
Date prévue de l'audit	Date planifiée pour la réalisation de l'audit interne en SST
Responsable de l'audit	Personne chargée de mener l'audit
Indicateurs de performance de suivi	Indicateurs établis pour l'évaluation de la performance en SST
Résultats de l'audit	Constats, écarts et/ou points de conformité relevés lors de l'audit
Actions recommandées	Mesures à établir en réponse aux résultats de l'audit
Date de réévaluation	Date prévue pour une nouvelle analyse du risque et/ou de la situation auditée
Responsable de la réévaluation	Personne chargée de revoir les risques et l'efficacité des actions qui sont prises
Ajustements	Traçabilité des modifications réalisées, des justifications et de l'amélioration continue

L'outil permet ainsi une mise en œuvre progressive, modulable et évolutive de la démarche systématique. Il s'adapte aux différents contextes organisationnels et sectoriels. Elle offre une analyse croisée des risques en contexte de transformation numérique et de complexité croissante des systèmes de travail.

#### 4.4. Discussions et limites

Le mémoire établit une démarche systématique de gestion des risques de SST dans le contexte des environnements complexes de l'Industrie 4.0. En fait, cette démarche, innovant et robuste, repose sur des fondements théoriques solides. De plus, elle se base sur une modélisation intégrée et itérative, tenant compte de la complexité croissante des systèmes sociotechniques.

La structure élaborée favorise une compréhension des risques spécifiquement en SST tout en dépassant les approches traditionnelles qui se limitent à des analyses linéaires ou centrées autour des défaillances techniques ou humaines. Ainsi, la conception de la démarche intègre des approches innovantes de gestion des risques de SST, basées sur la pensée complexe, qui

permettent de mieux cerner les interactions dynamiques au sein des systèmes sociotechniques. La structure élaborée favorise une meilleure compréhension des systèmes de travail et une anticipation proactive des risques émergents.

L'outil opérationnel proposé constitue un support structuré pour les entreprises qui facilite la mise en place de cette démarche. Dans cette optique, cet outil permet de guider les responsables de la SST dans l'identification, l'analyse, le traitement et le suivi des risques. Offrant une traçabilité des décisions prises, cet outil adapte à différents types d'organisations.

Cet outil permet une personnalisation réelle pour divers environnements industriels largement différents grâce à sa structure modulaire et flexible. En effet, chaque module peut être adapté en fonction des spécialités de l'entreprise (secteur d'activité, taille, niveau de maturité numérique, contexte organisationnel). Cette adaptabilité repose notamment sur la considération des données propres à l'entreprise (Module 1) et sur l'identification contextuelle des éléments du système et des risques (Module 2 et 3). Ces paramètres permettent d'ajuster les analyses et les mesures à la réalité de chaque milieu industriel.

Les études établies dans ce mémoire appuient la nécessité d'adopter une démarche innovante de gestion des risques de SST, spécifiquement dans les environnements complexes et interconnectés. Certains travaux révèlent les limites des approches classiques, souvent jugées inadéquates pour anticiper les risques émergents liés à la complexité croissante des systèmes numériques. Ils soulignent l'intérêt des approches systémiques et adaptatives qui sont capables de mieux saisir les interactions entre les dimensions humaines, organisationnelles, environnementales et techniques. Dans cette optique, ces constats valident la pertinence de la démarche développée dans ce mémoire, qui s'inscrit largement dans une logique de compréhension globale et dynamique des risques en SST.

La démarche systématique révèle certaines limites. En effet, sa complexité méthodique peut ainsi poser un obstacle à son intégration dans les petites structures ou celles qui manquent des ressources suffisantes en SST ou en transformation numérique. La démarche est bien structurée, mais sa validation par des données réelles sur terrain permet de concrétiser son intérêt.

L'application de chacune des étapes de la démarche systématique sur le terrain exige un intervalle de temps important. De surcroit, la mise en œuvre opérationnelle de la démarche demande une implication continue pour repérer les risques spécifiquement les risques émergents, collecter les données, ajuster les plans d'action et de suivi selon les changements du

système étudié. En outre, l'orientation stratégique de l'analyse des risques implique l'application des approches traditionnelles de gestion des risques de SST, montrant souvent leurs limites dans des environnements complexes. D'où, le recours à des approches plus avancées et adéquates avec ses environnements interconnectés est nécessaire. Cependant, ces approches innovantes exigent un effort méthodique considérable, tant pour l'adoption que pour l'application, qui rendent leur mise en œuvre typiquement difficile dans un intervalle de temps restreint. L'ensemble de ses contraintes expliquent la focalisation sur la modélisation complète de la démarche dans cette démarche.

Les différences étudiées entre les régions ne peuvent pas être pleinement comprises sans considérer les contextes organisationnels, réglementaires et sociétaux propres à chacune. Cette approche comparative adoptée ne se limite pas à une évaluation des performances de gestion utilisées, mais elle s'appuie également sur une lecture contextuelle des cadres législatifs, du rôle des institutions, des normes culturelles associées au travail, et de niveau de maturité des systèmes. Ainsi, cette prise en compte permet d'éviter une analyse uniforme et de mieux cerner les logiques d'action et les différentes contraintes propres à chaque région. Dans cette optique, les spécificités locales enrichissent l'interprétation des écarts tout en contribuant à distinguer les leviers d'amélioration adaptés aux réalités de chaque territoire.

Les futures perspectives de recherche consisteront à expérimenter la démarche dans des milieux industriels afin d'affiner certains aspects de la démarche. Par ailleurs, ces perspectives permettront d'optimiser l'intégration de la démarche dans la gestion des risques spécifiquement en SST et de valider sa valeur ajoutée via l'outil proposé.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

La transformation numérique des environnements industriels remanie les modes d'organisation, les systèmes de production, et la gestion des risques, générant ainsi une complexité inédite. Dans ce contexte, la SST, se trouvant au cœur de nouveaux enjeux, nécessite une révision en profondeur de ses approches de gestion des risques pour répondre à ces nouveaux défis.

Le présent travail a permis de concevoir une démarche systématique de gestion des risques de SST, adaptée aux environnements complexes en mutation numérique. Cette démarche propose une lecture dynamique des interactions systémiques, introduisant les approches basées sur la pensée complexe afin d'aborder les interactions entre les éléments d'un système, d'évaluer les risques de manière dynamique, et d'alléger les mesures avec la réalité des milieux industriels contemporains.

La démarche a été traduite en un outil pratique, servant les entreprises à identifier les éléments du système, analyser les risques, orienter les stratégies de l'analyse de la sécurité, contrôler les mesures, et adopter un suivi continu. En tenant compte de la complexité croissante de leurs environnements de travail, cet outil permet d'assister les décideurs dans la prise en charge systématique des risques de SST. Cette démarche s'aligne sur les exigences de l'Industrie 4.0, en dépassant les approches traditionnelles, tout en préparant les entreprises à une gestion durable et résiliente des pratiques en SST.

Ce travail ouvre ainsi la voie à de nouvelles perspectives de recherche, notamment l'expérimentation du ce modèle de gestion des risques émergents dans divers secteurs d'activité, son enrichissement par des outils numériques d'aide à la décision et d'analyse prédictive, et l'évaluation de son efficacité à long terme.

## RÉFÉRENCES

- Abdulhameed, O., Al-Ahmari, A., Ameen, W., & Mian, S. H. (2019). Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(2), 1687814018822880.
- Aceto, G., Persico, V., & Pescapé, A. (2020). Industry 4.0 and health: Internet of things, big data, and cloud computing for healthcare 4.0. *Journal of Industrial Information Integration*, 18, 100129.
- Adair, P., & Fhima, F. (2013). Le financement des PME en Tunisie: dépendance à l'égard des banques et rationnement du crédit. *Revue internationale PME*, 26(3), 117-138.
- Adriaensen, A., Decré, W., & Pintelon, L. (2019). Can complexity-thinking methods contribute to improving occupational safety in industry 4.0? A review of safety analysis methods and their concepts. *Safety*, 5(4), 65.
- Afgan, N., & Veziroglu, A. (2012). Sustainable resilience of hydrogen energy system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(7), 5461-5467.
- Allaouat, F. (2016). La «transition numérique»: quels enjeux pour l'entreprise algérienne. *La revue des Sciences Commerciales*, 15(1), 61-74.
- Amaral, L. A. N., & Uzzi, B. (2007). Complex systems—A new paradigm for the integrative study of management, physical, and technological systems. *Management science*, 53(7), 1033-1035.
- Arena, F., Collotta, M., Pau, G., & Termine, F. (2022). An overview of augmented reality. *Computers*, 11(2), 28.
- Arnaldi, B., Guittot, P., & Moreau, G. (2018). *Réalité virtuelle et réalité augmentée: Mythes et réalités*. ISTE Group.
- Arribi, C., & Boutarfa, S. (2024). Digital Transformation: Opportunities and Challenges of Digitization in Algeria. *Economic Researcher Review*, 12(1).
- Aven, T. (2010). On how to define, understand and describe risk. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(6), 623-631.
- Aven, T. (2012). The risk concept—historical and recent development trends. *Reliability Engineering & System Safety*, 99, 33-44.
- Ávila-Gutiérrez, M. J., Suárez-Fernandez de Miranda, S., & Aguayo-González, F. (2022). Occupational safety and health 5.0—A model for multilevel strategic deployment

- aligned with the sustainable development goals of agenda 2030. *Sustainability*, 14(11), 6741.
- Badri, A. (2015). The challenge of integrating OHS into industrial project risk management: Proposal of a methodological approach to guide future research (case of mining projects in Quebec, Canada). *Minerals*, 5(2), 314-334.
- Badri, A., Boudreau-Trudel, B., & Souissi, A. S. (2018). Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? *Safety Science*, 109, 403-411.
- Badri, A., Nadeau, S., & Gbodossou, A. (2013). A new practical approach to risk management for underground mining project in Quebec. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(6), 1145-1158.
- Balland, P.-A., & Boschma, R. (2021). Mapping the potentials of regions in Europe to contribute to new knowledge production in Industry 4.0 technologies. *Regional Studies*, 55(10-11), 1652-1666.
- Baril-Gingras, G., & Cox, R. (2022). Réforme du régime de prévention en SST au Québec. *Relations industrielles/Industrial Relations*, 77(4), 1-24.
- Bartodziej, C. J. (2017). The concept industry 4.0. An empirical analysis of technologies and applications in production logistics (pp. 27–50). In: Springer Gabler, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-16502-4>.
- Ben Youssef, A. (2021). Digital Transformation in Tunisia: Under which Conditions Could the Digital Economy Benefit Everyone?
- Benakka, L., Gharbi, L. Z., Bacroume, S., Bejjaji, Z., & Aouane, M. (2021). The implementation of the occupational health and safety management system according to OHSAS 18001/2007 in a Moroccan telecommunication company. E3S Web of Conferences,
- Benali, B. (2018). 1711a Cooperation in the field of occupational health and safety in north africa. In: BMJ Publishing Group Ltd.
- Bendriss 1, J., Lavayssière 2, B., & Tilden 3, M. (2014). Le financement des PME en France: un contexte particulier, favorable aux innovations. *Revue d'économie financière*(2), 241-254.
- Benkhalifa, A. (2024). The Impact of the new Occupational Health Regulation in Tunisia.
- Benmokrane, M. (2022). *Étude des impacts socioéconomiques des projets de transformation numérique des petites et moyennes entreprises sous une optique de développement durable* Université du Québec à Trois-Rivières].

- Bérard, C. (2009). *Le processus de décision dans les systèmes complexes: une analyse d'une intervention systémique* Université Paris Dauphine-Paris IX; Université du Québec à Montréal].
- Bianchini, A., Donini, F., Pellegrini, M., & Saccani, C. (2017). An innovative methodology for measuring the effective implementation of an Occupational Health and Safety Management System in the European Union. *Safety Science*, 92, 26-33.
- Bignon, C., & Badri, A. (2019). A comparative analysis of the two main documents used in small and medium-sized enterprises in France and Québec as a framework for improving occupational health and safety. *Open Journal of Safety Science and Technology*, 9(1), 22-36.
- Bjerga, T., Aven, T., & Zio, E. (2016). Uncertainty treatment in risk analysis of complex systems: The cases of STAMP and FRAM. *Reliability Engineering & System Safety*, 156, 203-209.
- Blatz, F., Bulander, R., & Dietel, M. (2018). Maturity model of digitization for SMEs. 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC),
- Bouchard, S., Abdulnour, G., & Gamache, S. (2022). Agility and industry 4.0 implementation strategy in a quebec manufacturing sme. *Sustainability*, 14(13), 7884.
- Boulenger, S., & Vaillancourt, F. (2012). *Coûts des régimes de SST: méthodologie et résultats de la comparaison entre la CSST du Québec et la CSPAAT de l'Ontario*. CIRANO.
- Božić, V. (2023). Complex systems.
- Brocal, F. (2016). Uncertainties and challenges when facing new and emerging occupational risks. In (Vol. 19, pp. 6-9).
- Brocal, F., González-Gaya, G., Sebastián, M. A., Reniers, G., & Paltrinieri, N. (2019). Emerging risk management versus traditional risk: Differences and challenges in the context of occupational health and safety. 29th European Safety and Reliability Conference,
- Brocal, F., González, C., Komljenovic, D., Katina, P. F., & Sebastián, M. A. (2019). Emerging risk management in industry 4.0: an approach to improve organizational and human performance in the complex systems. *Complexity*, 2019(1), 2089763.
- Brocal, F., González, C., Reniers, G., Cozzani, V., & Sebastián, M. A. (2018). Risk management of hazardous materials in manufacturing processes: links and transitional spaces between occupational accidents and major accidents. *Materials*, 11(10), 1915.

- Brocal, F., González, C., & Sebastián, M. (2017). Theoretical framework for the new and emerging occupational risk modeling and its monitoring through technology lifecycle of industrial processes. *Safety Science*, 99, 178-186.
- Brocal, F., González, C., & Sebastián, M. (2018). Technique to identify and characterize new and emerging risks: A new tool for application in manufacturing processes. *Safety Science*, 109, 144-156.
- Brocal, F., Sebastián, M., & González, C. (2017). Theoretical framework for the new and emerging occupational risk modeling and its monitoring through technology lifecycle of industrial processes. *Safety Science*, 99, 178-186.
- Brocal, F., Sebastián, M. A., & González, C. (2019). Advanced manufacturing processes and technologies. In *Management of Emerging Public Health Issues and Risks* (pp. 31-64). Elsevier.
- Brodny, J., & Tutak, M. (2021). Assessing the level of digital maturity of enterprises in the Central and Eastern European countries using the MCDM and Shannon's entropy methods. *Plos one*, 16(7), e0253965.
- Brun, E. (2009). *Expert forecast on emerging chemical risks related to occupational safety and health* (Vol. 8). Office for Official Publications of the European Communities.
- Burton, S., McDermid, J. A., Garnett, P., & Weaver, R. (2021). Safer Complex Systems: An Initial Framework.
- Busque, M.-A., Boucher, A., Lebeau, M., & Bastien, N. (2020). Évolution des indicateurs annuels de lésions professionnelles indemnisées au Québec de 2012 à 2017.
- Busque, M.-A., Lebeau, M., Tremblay, M.-A., Boucher, A., & Duguay, P. (2022). Portrait statistique des lésions professionnelles indemnisées au Québec en 2015-2016.
- Cagno, E., Micheli, G. J., & Perotti, S. (2011). Identification of OHS-related factors and interactions among those and OHS performance in SMEs. *Safety Science*, 49(2), 216-225.
- Cantonnet, M. L., Aldasoro, J. C., & Iradi, J. (2019). New and emerging risks management in small and medium-sized Spanish enterprises. *Safety Science*, 113, 257-263.
- Carayon, P., Hancock, P., Leveson, N., Noy, I., Sznelwar, L., & Van Hoogtem, G. (2015). Advancing a sociotechnical systems approach to workplace safety—developing the conceptual framework. *Ergonomics*, 58(4), 548-564.
- Caron, D. J., Chartier, B., Bernardi, S., & Maheux, L. (2020). *Document d'appui à l'élaboration d'un baromètre pour mesurer l'évolution de la mise en oeuvre de la stratégie de transformation numérique du Québec: étude de cas sur les hypothèses de*

*transformation: le cas du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.* Chaire de recherche en exploitation des ressources informationnelles, ENAP.

- Catlin, T., Scanlan, J., & Willmott, P. (2015). Raising your digital quotient. *McKinsey Quarterly*, 3, 30-43.
- Champoux, D., & Brun, J.-P. (2010). Dispositions, capacités et pratiques de SST dans les petites entreprises: opinions de patrons, d'employés et d'intervenants en SST au Québec. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*(12-2).
- Chan, A. H., Kwok, W., & Duffy, V. G. (2004). Using AHP for determining priority in a safety management system. *Industrial Management & Data Systems*, 104(5), 430-445.
- Chan, S. (2001). Complex adaptive systems. ESD. 83 Research Seminar in Engineering Systems,
- Chouaibi, S., Festa, G., Quaglia, R., & Rossi, M. (2022). The risky impact of digital transformation on organizational performance—evidence from Tunisia. *Technological forecasting and social change*, 178, 121571.
- Cilliers, P. (2002). *Complexity and postmodernism: Understanding complex systems*. routledge.
- Cinar, Z. M., Nuhu, A. A., Zeeshan, Q., & Korhan, O. (2019). Digital twins for industry 4.0: a review. Global Joint Conference on Industrial Engineering and Its Application Areas,
- Côté, A. (2010). L'implantation des processus prescrits par le programme de prévention prévu à la Loi sur la santé et la sécurité du travail du Québec et les systèmes de gestion de la santé et de la sécurité du travail (SGSST): une étude de cas dans un établissement du secteur manufacturier québécois.
- Coze, J.-c. L. (2005). Are organisations too complex to be integrated in technical risk assessment and current safety auditing? *Safety Science*, 43(8), 613-638.
- da Silva, S. L. C., & Amaral, F. G. (2019). Critical factors of success and barriers to the implementation of occupational health and safety management systems: A systematic review of literature. *Safety Science*, 117, 123-132.
- Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of production economics*, 204, 383-394.
- Daniels, C., Erforth, B., & Teevan, C. (2023). *Africa–Europe Cooperation and Digital Transformation*. Taylor & Francis.
- Dekker, S., Cilliers, P., & Hofmeyr, J.-H. (2011). The complexity of failure: Implications of complexity theory for safety investigations. *Safety Science*, 49(6), 939-945.

- Demikhov, O., Opanasiuk, Y., Demikhova, N., & Merisalu, E. (2023). A digital transformation into occupational health and safety systems: a review of the best practices in Europe.
- Dezalay, Y. (2007). De la défense de l'environnement au développement durable: l'émergence d'un champ d'expertise des politiques européennes. *Actes de la recherche en sciences sociales*, 166(1), 66-79.
- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 545-554.
- Djeflat, A. (2006). Le système de support technologique (SST) au Maghreb: cas des PME en Algérie et en Tunisie. *L'intégration de la science au développement, expériences maghrébines*, ADEES, Publisud, 88-104.
- Domingues, M., Roçadas, A., Fernandes, A., Silva, C., Martins, J., Cabral, A., & Diogo, M. (2013). Complex systems application at risk prevention in processing and use of hydrogen technologies. IV Iberian Symposium on Hydrogen, Fuel Cells and Advanced Batteries, Estoril, Portugal,
- Ebert, C., & Duarte, C. H. C. (2018). Digital transformation. *IEEE Softw.*, 35(4), 16-21.
- El Aynaoui, K., Jaïdi, L., & Zaoui, A. (2022). Digitalise to Industrialise: Egypt, Morocco, Tunisia, and the Africa–Europe Partnership. In *Africa–Europe Cooperation and Digital Transformation* (pp. 100-115). Routledge.
- Elkosantini, S., Hajri-Gabouj, S., Darmoul, S., Kacem, R. B., Ammar, A., Elouadi, A., Ghrairi, Z., Moalla, N., Bentaha, M. L., & Sarraipa, J. (2023). Industrial needs v. Engineering education curricula related to maintenance, production and quality in industry 4.0: A gap analysis case study in Tunisia and Morocco. *Industry and Higher Education*, 37(5), 634-652.
- Erol, S., Jäger, A., Hold, P., Ott, K., & Sihn, W. (2016). Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production. *procedia CIRP*, 54, 13-18.
- Faye, C. (2021). Évolution de la SST au Québec: la recherche permanente d'une conciliation entre protection des travailleurs et efficacité du régime. *Revue Organisations & territoires*, 30(3), v-vii.
- Fernández, F. B., & Pérez, M. Á. S. (2015). Analysis and modeling of new and emerging occupational risks in the context of advanced manufacturing processes. *Procedia engineering*, 100, 1150-1159.
- Fischer-Hübner, S., Alcaraz, C., Ferreira, A., Fernandez-Gago, C., Lopez, J., Markatos, E., Islami, L., & Akil, M. (2021). Stakeholder perspectives and requirements on cybersecurity in Europe. *Journal of information security and applications*, 61, 102916.

- Flott, K., Callahan, R., Darzi, A., & Mayer, E. (2016). A patient-centered framework for evaluating digital maturity of health services: a systematic review. *Journal of medical Internet research, 18*(4), e75.
- Fraga-Lamas, P., Fernandez-Carames, T. M., Blanco-Novoa, O., & Vilar-Montesinos, M. A. (2018). A review on industrial augmented reality systems for the industry 4.0 shipyard. *IEEE access, 6*, 13358-13375.
- Gagliardi, D., Marinaccio, A., Valenti, A., & Iavicoli, S. (2012). Occupational safety and health in Europe: lessons from the past, challenges and opportunities for the future. *Industrial health, 50*(1), 7-11.
- Gamache, S. (2019). *Stratégies de mise en oeuvre de l'industrie 4.0 dans les petites et moyennes entreprises manufacturières québécoises* Université du Québec à Chicoutimi].
- Gamache, S., Abdul-Nour, G., & Baril, C. (2019a). Development of a digital performance assessment model for Quebec manufacturing SMEs. *Procedia Manufacturing, 38*, 1085-1094.
- Gamache, S., Abdul-Nour, G., & Baril, C. (2019b). Étude du potentiel de l'Industrie 4.0 quant à la transformation de la PME manufacturière québécoise: une analyse littéraire et expérimentale= Study of the potential of Industry 4.0 for the transformation of the Quebec manufacturing SME: A literary and experimental analysis. *Génie industriel et productique, 2*.
- Gamache, S., Abdul-Nour, G., & Baril, C. (2020). Evaluation of the influence parameters of Industry 4.0 and their impact on the Quebec manufacturing SMEs: The first findings. *Cogent Engineering, 7*(1), 1771818.
- Gattola, V., Patriarca, R., Tomasi, G., & Tronci, M. (2018). Functional resonance in industrial operations: A case study in a manufacturing plant. *IFAC-PapersOnLine, 51*(11), 927-932.
- Ghoneim, A. F., & Mandour, D. A. (2023). Digitalization and Disruptive Technologies in the Middle East and North Africa (MENA) and Sub-Saharan Africa (SSA) Regions.
- Glouberman, S., & Zimmerman, B. (2002). Complicated and complex systems: what would successful reform of Medicare look like?
- Goel, R., & Gupta, P. (2020). Robotics and industry 4.0. *A Roadmap to Industry 4.0: Smart Production, Sharp Business and Sustainable Development, 157-169*.
- Gokalp, M. O., Kayabay, K., Akyol, M. A., Eren, P. E., & Koçyiğit, A. (2016). Big data for industry 4.0: A conceptual framework. 2016 international conference on computational science and computational intelligence (CSCI),

- Graham, J. D., Fineberg, H., Helbing, D., Homer-Dixon, T., Kröger, W., Maila, M., McNeely, J., Michalowski, S., Millstone, E., & Wilson, M. (2010). The emergence of risks: contributing factors.
- Granerud, R. L., & Rocha, R. S. (2011). Organisational learning and continuous improvement of health and safety in certified manufacturers. *Safety Science*, 49(7), 1030-1039.
- Grøtan, T. O., Størseth, F., & Albrechtsen, E. (2011). Scientific foundations of addressing risk in complex and dynamic environments. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(6), 706-712.
- Häkkinen, K. (2015). Safety Management—from basic understanding towards excellence. *Integrated Occupational Safety and Health Management: Solutions and Industrial Cases*, 7-15.
- Hale, A. (2019). From national to European frameworks for understanding the role of occupational health and safety (OHS) specialists. *Safety Science*, 115, 435-445.
- Harms-Ringdahl, L. (2001). *Safety analysis: principles and practice in occupational safety*. CRC Press.
- Hettinger, L. J., Kirlik, A., Goh, Y. M., & Buckle, P. (2015). Modelling and simulation of complex sociotechnical systems: envisioning and analysing work environments. *Ergonomics*, 58(4), 600-614.
- Hollnagel, E. (2008). The changing nature of risk. *Ergonomics Australia Journal*, 22(1-2), 33-46.
- Hollnagel, E. (2016). *Barriers and accident prevention*. Routledge.
- Hulme, A., Stanton, N. A., Walker, G. H., Waterson, P., & Salmon, P. M. (2019). What do applications of systems thinking accident analysis methods tell us about accident causation? A systematic review of applications between 1990 and 2018. *Safety Science*, 117, 164-183.
- Hutchins, G. (2018). *ISO 31000: 2018 enterprise risk management*. Greg Hutchins.
- Imbeau, D., Aubry, K., & Chiasson, M.-È. (2012). Suivi du déploiement d'un programme d'amélioration continue augmenté d'un volet SST/ergonomie dans une entreprise manufacturière au Québec: recherche-action 2003-2010.
- IRGC, I. R. G. C. (2015). Guidelines for Emerging Risk Governance, International Risk Governance Council (IRGC). Lausann, Switzerland.
- Jaafari, A. (2001). Management of risks, uncertainties and opportunities on projects: time for a fundamental shift. *International journal of project management*, 19(2), 89-101.

- Jan, Z., Ahamed, F., Mayer, W., Patel, N., Grossmann, G., Stumptner, M., & Kuusk, A. (2023). Artificial intelligence for industry 4.0: Systematic review of applications, challenges, and opportunities. *Expert Systems with Applications*, 216, 119456.
- Jarota, M. (2021). Artificial intelligence and robotisation in the EU-should we change OHS law? *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 16(1), 18.
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2022). Artificial intelligence applications for industry 4.0: A literature-based study. *Journal of Industrial Integration and Management*, 7(01), 83-111.
- Jemaa, A. B. (2013). La maîtrise du risque chimique en entreprise en Tunisie Problématique et perspectives. *Revue Tunisienne de Pathologie Professionnelle et de l'Environnement*(2), 11-12.
- Jilcha, K., & Kitaw, D. (2017). Industrial occupational safety and health innovation for sustainable development. *Engineering science and technology, an international journal*, 20(1), 372-380.
- Johnson, C. W. (2006). What are emergent properties and how do they affect the engineering of complex systems? *Reliability Engineering and System Safety*, 91(12), 1475-1481.
- Julien, N., & Martin, É. (2020). *Le jumeau numérique: De l'intelligence artificielle à l'industrie agile*. Dunod.
- 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. *Safety*, 4(1), 5.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. *Final report of the Industrie*, 4(0), 82.
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process safety and environmental protection*, 117, 408-425.
- Karanikas, N., Weber, D., Bruschi, K., & Brown, S. (2022). Identification of systems thinking aspects in ISO 45001: 2018 on occupational health & safety management. *Safety Science*, 148, 105671.
- Khan, M., Wu, X., Xu, X., & Dou, W. (2017). Big data challenges and opportunities in the hype of Industry 4.0. 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC),
- Kim, J. H. (2017). A review of cyber-physical system research relevant to the emerging IT trends: industry 4.0, IoT, big data, and cloud computing. *Journal of Industrial Integration and Management*, 2(03), 1750011.

- Komljenovic, D., Loiselle, G., & Kumral, M. (2017). Organization: A new focus on mine safety improvement in a complex operational and business environment. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(4), 617-625.
- Ladyman, J., Lambert, J., & Wiesner, K. (2013). What is a complex system? *European Journal for Philosophy of Science*, 3, 33-67.
- Lakemond, N., Holmberg, G., & Pettersson, A. (2021). Digital transformation in complex systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 192-204.
- Lalonde, C., & Boiral, O. (2012). Managing risks through ISO 31000: A critical analysis. *Risk management*, 14, 272-300.
- Lampropoulos, G., Siakas, K., & Anastasiadis, T. (2019). Internet of things in the context of industry 4.0: An overview. *International Journal of Entrepreneurial Knowledge*, 7(1).
- Laraqui, C., Caubet, A., Harourate, K., Laraqui, O., & Verger, C. (1999). Occupational health and safety in Morocco: present and future. *La Medicina del lavoro*, 90(4), 596-606.
- Laraqui, O., Laraqui, S., Manar, N., Ghailan, T., Deschamps, F., & Laraqui, C. (2018). Santé et sécurité au travail au Maroc 60 ans après l'indépendance: état actuel, contraintes et perspectives. *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 79(1), 1-9.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 6, 239-242.
- Le Moigne, J.-L. (1994). *La théorie du système général: théorie de la modélisation*. FeniXX.
- Lee, J., Davari, H., Singh, J., & Pandhare, V. (2018). Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 18, 20-23.
- Liagkou, V., Salmas, D., & Stylios, C. (2019). Realizing virtual reality learning environment for industry 4.0. *procedia CIRP*, 79, 712-717.
- Liao, Y., Ramos, L. F. P., Saturno, M., Deschamps, F., Loures, E. d. F. R., & Szejka, A. L. (2017). The role of interoperability in the fourth industrial revolution era. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 12434-12439.
- Lomazzi, L., & Lomazzi, L. (2019). *Financer l'intelligence artificielle, quelles retombées économiques et sociales pour le Québec?* Institut de recherche et d'informations socio-économiques.
- Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. (2015). Internet of Things (IoT): A literature review. *Journal of Computer and Communications*, 3(5), 164-173.
- Magee, C. L., & de Weck, O. L. (2004). 3.1. 3 Complex System Classification. INCOSE International Symposium,

- Mahajan, H. S., Bradley, T., & Pasricha, S. (2017). Application of systems theoretic process analysis to a lane keeping assist system. *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 177-183.
- Malinda, A., & Soediantono, D. (2022). Benefits of Implementing ISO 45001 Occupational Health and Safety Management Systems and Implementation Suggestion in the Defense Industry: A Literature Review. *Journal of Industrial Engineering & Management Research*, 3(2), 35-47.
- Manavalan, E., & Jayakrishna, K. (2019). A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. *Computers & industrial engineering*, 127, 925-953.
- Manogaran, G., Thota, C., Lopez, D., & Sundarasekar, R. (2017). Big data security intelligence for healthcare industry 4.0. *Cybersecurity for Industry 4.0: Analysis for Design and Manufacturing*, 103-126.
- Marchand, A., Beauregard, N., & Voirol, C. (2014). Un portrait de la situation de la santé et de la sécurité du travail au Québec. *L'intervention en santé et en sécurité du travail*, 111.
- Martínez-García, M., & Hernández-Lemus, E. (2013). Health systems as complex systems.
- Mocquet, B. (2023). Schallum PIERRE et Fehmi JAAFAR (2021), Médias sociaux: perspectives sur les défis liés à la cybersécurité, la gouvernementalité algorithmique et l'intelligence artificielle. Québec, Presses de l'Université Laval. *Communication. Information médias théories pratiques*, 40(1).
- Mofidi Naeini, A., & Nadeau, S. (2021). FRAM and STAMP new avenue for risk analysis of manufacturing in the context of industry 4.0.
- Morillas, R. M., Rubio-Romero, J. C., & Fuertes, A. (2013). A comparative analysis of occupational health and safety risk prevention practices in Sweden and Spain. *Journal of safety research*, 47, 57-65.
- Motet, G. (2009). *La norme ISO 31000 en 10 questions*. FonCSI.
- Moyo, D., Zungu, M., Kgalamono, S., & Mwila, C. D. (2015). Review of occupational health and safety organization in expanding economies: the case of Southern Africa. *Annals of global health*, 81(4), 495-502.
- Nachit, H., & Belhcen, L. (2020). Digital transformation in times of COVID-19 Pandemic: the case of Morocco. Available at SSRN 3645084.
- Newman, M. (2011). Resource letter cs-1: Complex systems. *American Journal of Physics*, 79(8), 800-810.

- Ochoa, O. L. (2016). Modelos de madurez digital: ¿en qué consisten y qué podemos aprender de ellos?/digital maturity models: what are they and what can we learn from them? *Boletín de estudios económicos*, 71(219), 573.
- Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in industry*, 83, 121-139.
- Ortega-Gras, J.-J., Bueno-Delgado, M.-V., Cañavate-Cruzado, G., & Garrido-Lova, J. (2021). Twin transition through the implementation of industry 4.0 technologies: Desk-research analysis and practical use cases in Europe. *Sustainability*, 13(24), 13601.
- Paszkiewicz, A., Salach, M., Dymora, P., Bolanowski, M., Budzik, G., & Kubiak, P. (2021). Methodology of implementing virtual reality in education for industry 4.0. *Sustainability*, 13(9), 5049.
- Patriarca, R., Di Gravio, G., Woltjer, R., Costantino, F., Praetorius, G., Ferreira, P., & Hollnagel, E. (2020). Framing the FRAM: A literature review on the functional resonance analysis method. *Safety Science*, 129, 104827.
- 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. *IEEE access*, 8, 220121-220139.
- Perminova, O., Gustafsson, M., & Wikström, K. (2008). Defining uncertainty in projects—a new perspective. *International journal of project management*, 26(1), 73-79.
- Pires, F., Cachada, A., Barbosa, J., Moreira, A. P., & Leitão, P. (2019). Digital twin in industry 4.0: Technologies, applications and challenges. 2019 IEEE 17th international conference on industrial informatics (INDIN),
- Poulin, G., Prévil, C., Saint-Onge, B., & Waaub, J.-P. (2001). Un système intégré d'aide à la décision pour gérer le territoire en tenant compte des dimensions environnementale et participative du développement durable. Le cas du SIAD Outaouais, Québec, Canada/A n integrated system of computer assisted decision-making for spatial participative management. The case of the Outaouais region of Quebec. *Géocarrefour*, 76(3), 253-264.
- Qian, F., Zhong, W., & Du, W. (2017). Fundamental theories and key technologies for smart and optimal manufacturing in the process industry. *Engineering*, 3(2), 154-160.
- Qiao, W., Li, X., & Liu, Q. (2019). Systemic approaches to incident analysis in coal mines: Comparison of the STAMP, FRAM and “2–4” models. *Resources Policy*, 63, 101453.

- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A categorical framework of manufacturing for industry 4.0 and beyond. *procedia CIRP*, 52, 173-178.
- Racine, I. (2021). *Identification des obstacles socio-économiques aux technologies durables dans le domaine de la construction au Québec*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Reuter, M., Oberc, H., Wannöffel, M., Kreimeier, D., Klippert, J., Pawlicki, P., & Kuhlenkötter, B. (2017). Learning factories' trainings as an enabler of proactive workers' participation regarding Industrie 4.0. *Procedia Manufacturing*, 9, 354-360.
- Ribeiro, J., Lima, R., Eckhardt, T., & Paiva, S. (2021). Robotic process automation and artificial intelligence in industry 4.0—a literature review. *Procedia Computer Science*, 181, 51-58.
- Roig, B., & Brocal, F. (2019). Introduction: needs on emerging risk and management. In (pp. xvii-xxi): Elsevier.
- Roldán, J. J., Crespo, E., Martín-Barrio, A., Peña-Tapia, E., & Barrientos, A. (2019). A training system for Industry 4.0 operators in complex assemblies based on virtual reality and process mining. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 59, 305-316.
- Roy, D. (2018). *La gestion de la complexité à travers les approches de développement durable dans les organisations: analyse de l'approche BNQ 21000* Université de Sherbrooke].
- Safety, E. A. f., & Work, H. a. (2023). Occupational Safety and Health in Europe: State and Trends 2023. In: Publications Office of the European Union Luxembourg.
- Sakowski, P., & Marcinkiewicz, A. (2019). Health promotion and prevention in occupational health systems in Europe. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 32(3).
- Salehi, V., Veitch, B., & Smith, D. (2021). Modeling complex socio-technical systems using the FRAM: A literature review. *Human factors and ergonomics in manufacturing & service industries*, 31(1), 118-142.
- Salmon, P. M., Walker, G. H., Read, G. J., Goode, N., & Stanton, N. A. (2020). Fitting methods to paradigms: are ergonomics methods fit for systems thinking? In *New Paradigms in Ergonomics* (pp. 44-55). Routledge.
- Sanders, A., Elangeswaran, C., & Wulfsberg, J. P. (2016). Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 9(3), 811-833.
- Schallmo, D., Williams, C. A., & Lohse, J. (2018). Clarifying digital strategy—Detailed literature review of existing Approaches. ISPIM Conference Proceedings,

- Schepers, S. (2016). Comment sauver l'innovation industrielle en Europe? *Le Journal de l'École de Paris du management*(5), 23-28.
- Schmidt, R., Möhring, M., Härtig, R.-C., Reichstein, C., Neumaier, P., & Jozinović, P. (2015). Industry 4.0-potentials for creating smart products: empirical research results. Business Information Systems: 18th International Conference, BIS 2015, Poznań, Poland, June 24-26, 2015, Proceedings 18,
- Schwer, K., Hitz, C., Wyss, R., Wirz, D., & Minonne, C. (2018). Digital maturity variables and their impact on the enterprise architecture layers. *Problems and perspectives in management*(16, Iss. 4), 141-154.
- Shahbaz, W., & Sajjad, A. (2021). Integrating management control systems, mindfulness and sustainability: an occupational health and safety perspective. *Corporate Governance: The International Journal of Business in Society*, 21(3), 433-449.
- Šolc, M., Blaško, P., Girmanová, L., & Kliment, J. (2022). The development trend of the occupational health and safety in the context of ISO 45001: 2018. *Standards*, 2(3), 294-305.
- Soori, M., Dastres, R., Arezoo, B., & Jough, F. K. G. (2024). Intelligent robotic systems in Industry 4.0: A review. *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*, 2024007-2024000.
- Syam, N., & Sharma, A. (2018). Waiting for a sales renaissance in the fourth industrial revolution: Machine learning and artificial intelligence in sales research and practice. *Industrial marketing management*, 69, 135-146.
- SZCZEPANSKI, M. (2019). Digital Europe programme: Funding digital transformation beyond 2020.
- Takala, J., Hämäläinen, P., Sauni, R., Nygård, C.-H., Gagliardi, D., & Neupane, S. (2024). Global-, regional-and country-level estimates of the work-related burden of diseases and accidents in 2019. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 50(2), 73.
- Tantawi, K. H., Sokolov, A., & Tantawi, O. (2019). Advances in industrial robotics: From industry 3.0 automation to industry 4.0 collaboration. 2019 4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-iCON),
- Tarik, B., & Adil, H. A. (2018). Occupational health and safety in the Moroccan construction sites: preliminary diagnosis. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 9, 6.
- Thames, L., & Schaefer, D. (2017). *Cybersecurity for industry 4.0*. Springer.

- Thatshayini, P., & Rajini, P. (2018). Occupational safety and health hazards of apparel sector: perspective of northern province employees of Sri Lanka. *Journal of Business Studies*, 5(1).
- Tremblay, D.-G., Yagoubi, A., & Psyché, V. (2022). Digital transformation: An analysis of the role of technology service providers in Montreal's emerging AI Business Ecosystem. *Digitalization and Firm Performance: Examining the Strategic Impact*, 17-44.
- Tutak, M., & Brodny, J. (2022). Business digital maturity in Europe and its implication for open innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8(1), 27.
- Underwood, P., & Waterson, P. (2013). Accident analysis models and methods: guidance for safety professionals. *Loughborough University*.
- Ustundag, A., Cevikcan, E., Salkin, C., Oner, M., Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2018). A conceptual framework for Industry 4.0. *Industry 4.0: managing the digital transformation*, 3-23.
- Vézina, M., Cloutier, E., Stock, S., Lippel, K., Fortin, É., Delisle, A., St-Vincent, M., Funes, A., Duguay, P., & Vézina, S. (2011). Enquête québécoise sur des conditions de travail, d'emploi et de SST (EQCOTESST).
- Vial, G. (2021). Understanding digital transformation: A review and a research agenda. *Managing digital transformation*, 13-66.
- Villa, V., Paltrinieri, N., Khan, F., & Cozzani, V. (2016). Towards dynamic risk analysis: A review of the risk assessment approach and its limitations in the chemical process industry. *Safety Science*, 89, 77-93.
- Von Tunzelmann, N. (2003). Historical coevolution of governance and technology in the industrial revolutions. *Structural Change and Economic Dynamics*, 14(4), 365-384.
- Waterson, P., Robertson, M. M., Cooke, N. J., Militello, L., Roth, E., & Stanton, N. A. (2015). Defining the methodological challenges and opportunities for an effective science of sociotechnical systems and safety. *Ergonomics*, 58(4), 565-599.
- Weaver, W. (1948). SCIENCE AND COMPLEXITY. *American Scientist*, 36(4), 536-544.  
<http://www.jstor.org/stable/27826254>
- Weyer, S., Schmitt, M., Ohmer, M., & Gorecky, D. (2015). Towards Industry 4.0-Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 579-584.
- Winkelhaus, S., & Grosse, E. H. (2020). Logistics 4.0: a systematic review towards a new logistics system. *International Journal of Production Research*, 58(1), 18-43.

- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*, 2012(1), 208760.
- Youssef, A. B. (2024). Digital Transformation in Tunisia: Under Which Conditions Could the Digital Economy Benefit Everyone?
- Zhang, Y., Dong, C., Guo, W., Dai, J., & Zhao, Z. (2022). Systems theoretic accident model and process (STAMP): A literature review. *Safety Science*, 152, 105596.
- Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2015). Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. 2015 12th International conference on fuzzy systems and knowledge discovery (FSKD),
- Zio, E. (2016). Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*, 152, 137-150.