

Le management des risques issus de l'adoption de l'industrie 4.0 : Revue de Littérature Systématique

Risk Management in Industry 4.0 Adoption: A Systematic Literature Review

Nouhaila ROUAS , (Doctorante-Chercheuse)

*Equipe de recherche en Management et Systèmes d'Information.
L'Ecole Nationale de Commerce et de Gestion Tanger,
Université Abdelmalek Essaâdi, Maroc*

Youssef AL MERIOUH, (Enseignant-Chercheur)

*Equipe de recherche en Management et Systèmes d'Information.
L'Ecole Nationale de Commerce et de Gestion Tanger,
Université Abdelmalek Essaâdi, Maroc*

Adresse de correspondance :	L'École Nationale de Commerce et de Gestion de Tanger Route de l'aéroport, B.P 1255, 90000 Tanger, Maroc Université Abdelmalek Essaâdi Tanger, Maroc 90000 encgtanger@encgt.ma Tél. +212 (0) 539 313 4 87
Déclaration de divulgation :	Les auteurs n'ont pas connaissance de quelconque financement qui pourrait affecter l'objectivité de cette étude et ils sont responsables de tout plagiat dans cet article.
Conflit d'intérêts :	Les auteurs ne signalent aucun conflit d'intérêts.
Citer cet article	ROUAS, N., & AL MERIOUH, Y. Le management des risques issus de l'adoption de l'industrie 4.0 : Revue de Littérature Systématique. <i>International Journal of Accounting, Finance, Auditing, Management and Economics</i> , 6(6), 58–78.
Licence	Cet article est publié en open Access sous licence CC BY-NC-ND

Received: 18/04/2025

Accepted: 31/05/2025

International Journal of Accounting, Finance, Auditing, Management and Economics - IJAFAME

ISSN: 2658-8455

Volume 6, Issue 06 (2025)

Le management des risques issus de l'adoption de l'industrie 4.0 : Revue de Littérature Systématique

Résumé :

L'industrie 4.0 (I4.0), porteuse de promesses économiques considérables, engendre une transformation radicale des processus industriels grâce à l'intégration des technologies numériques émergentes, telles que l'Internet des Objets (IoT), les Systèmes Cyber-Physiques (CPS), l'analyse du Big Data et le Cloud Computing. Ces technologies interconnectées permettent une automatisation accrue, une meilleure prise de décision basée sur les données et une optimisation des processus en temps réel. Ce nouveau paradigme industriel, cependant, s'accompagne d'une complexification des systèmes et de l'émergence de risques inédits liés à l'interconnexion, l'automatisation accrue et la dépendance aux données. L'efficacité de la gestion de ces risques est cruciale pour une transition réussie vers l'I4.0. Malgré l'importance de ce sujet tant par les chercheurs que par les industriels, la littérature manque d'une analyse synthétique et critique des travaux existants. Cet article vise à combler cette lacune en réalisant une revue systématique de la littérature de 39 publications scientifiques pertinentes, indexées dans Scopus et Web of Science et publiées entre 2011 et 2024. Notre analyse révèle la complexité de ces risques, allant des menaces cybernétiques aux enjeux socio-économiques et environnementaux. Si des méthodes classiques comme l'AMDEC et les approches MCDM restent utiles, elles sont insuffisantes face à l'interconnexion et l'incertitude inhérentes à l'Industrie 4.0. L'étude souligne le besoin d'approches holistiques et intégrées, combinant méthodes classiques et innovantes (Intelligence artificielle (IA), Big data), pour une gestion proactive et durable des risques, adaptée aux besoins spécifiques des différentes entreprises et secteurs. Des recherches futures sont nécessaires pour développer des cadres robustes et validés empiriquement.

Mots clés : Industrie 4.0, Systèmes Cyber-Physiques (CPS), Gestion des risques, Intelligence artificielle (IA), Méthodes multicritères de décision (MCDM).

Classification JEL: G32, M11, D81, L21

Type de l'article : Article théorique

Abstract :

Industry 4.0 (I4.0), with its significant economic potential, is driving a radical transformation of industrial processes through the integration of emerging digital technologies, such as the Internet of Things (IoT), Cyber-Physical Systems (CPS), Big Data analytics, and Cloud Computing. These interconnected technologies enable increased automation, enhanced data-driven decision-making and real-time process optimization. However, this new industrial paradigm also introduces increased system complexity and the emergence of novel risks related to interconnection, heightened automation, and data dependency. Effective management of these risks is crucial for a successful transition to I4.0. Despite the recognized importance of this topic for both researchers and industry practitioners, the literature lacks a comprehensive and critical analysis of existing work. This article addresses this gap by conducting a systematic literature review of 39 relevant scientific publications indexed in Scopus and Web of Science, published between 2011 and 2024. Our analysis reveals the multifaceted nature of these risks, ranging from cybersecurity threats to socio-economic and environmental challenges. While traditional methods like Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) approaches remain valuable, they are insufficient in addressing the inherent interconnection and uncertainty characteristic of Industry 4.0. This study highlights the need for holistic and integrated risk management approaches that combine established methods with innovative techniques, leveraging Artificial Intelligence (AI) and Big Data analytics. Such an approach enables proactive and sustainable risk management tailored to the specific needs of diverse companies and sectors. Future research is needed to develop robust, empirically validated frameworks for navigating the complex risks associated with I4.0 adoption.

Keywords: Industry 4.0, Risk management, Cyber-Physical Systems (CPS), Artificial intelligence (AI), Multi-criteria decision-making (MCDM).

Classification JEL: G32, M11, D81, L21

Paper type: Theoretical Research

1. Introduction

L'industrie 4.0 (I4.0), ou quatrième révolution industrielle, se caractérise par l'intégration des technologies numériques au sein des processus industriels. Portée par la numérisation et l'automatisation intelligente, comme l'Internet des objets (IoT), le cloud computing et l'intelligence artificielle (IA), l'I4.0 laisse entrevoir un impact économique considérable. Cet impact, estimé à 14 % des gains du PIB mondial d'ici 2030 (environ 15 000 milliards de dollars) selon une étude de Strategy& (une entité de PwC) en 2018 (Dutzler et al., 2018), induit une transformation profonde des modèles d'affaires et les relations entre entreprises, fournisseurs et clients. La personnalisation de masse et l'économie de la donnée deviennent centrales, favorisant l'émergence de nouveaux modèles basés sur les services, la collaboration et l'intégration des chaînes d'approvisionnement (Dutzler et al., 2018). Cette perspective fait de l'I4.0 un facteur clé de compétitivité pour les entreprises et les gouvernements (Öztemel et Gursev, 2020 ; Esposito et Kapoor, 2022).

Cependant, cette interconnexion, source d'opportunités, engendre également des vulnérabilités complexes et des risques nouveaux qui nécessitent une attention particulière. Si les travaux de Drath et Horsch (2014) mettent en avant le potentiel de l'analyse de données en temps réel et de la prise de décision autonome, ils se concentrent principalement sur la faisabilité technique, laissant de côté les risques inhérents à ces systèmes automatisés, tels que les violations de données et les biais algorithmiques. L'impact de l'I4.0 sur les modèles économiques est profond, transformant les relations entre entreprises, fournisseurs et clients (Dutzler et al., 2018). L'émergence de nouveaux modèles d'affaires, basés sur les services et la collaboration, contribue à cette croissance potentielle (Öztemel et Gursev, 2020 ; Esposito et Kapoor, 2022). Néanmoins, cette transformation rapide et complexe exige des entreprises une adaptation constante et une gestion accrue de l'incertitude (Tupa et al., 2017; Rajnai et Kocsis, 2017), rendant la planification stratégique plus délicate. De plus, la complexification des systèmes accroît la vulnérabilité aux cyberattaques et soulève des questions cruciales quant à la fiabilité et la résilience des systèmes (Preuveneers et al., 2017 ; Bahrin et al., 2016 ; Rajnai et Kocsis, 2017). Or, malgré l'importance d'une gestion des risques efficace dans ce contexte, la littérature actuelle manque d'une vision holistique et intégrée pour appréhender la complexité des risques liés à l'I4.0.

Face à ce constat, cet article propose une revue systématique de la littérature portant sur la gestion des risques liés à l'adoption de l'Industrie 4.0, en commençant par un état de l'art de l'Industrie 4.0 pour poser le contexte de la recherche. L'objectif principal est d'identifier les typologies de risques associés à cette transformation numérique, ainsi que les méthodes d'analyse et d'évaluation des risques employées, en vue d'optimiser la réussite de cette transition. La revue systématique se fonde sur une recherche bibliographique effectuée dans les bases de données Web of Science et Scopus, conformément aux lignes directrices PRISMA (Moher et al., 2009), considérant 39 publications publiées entre 2011 et 2024.

Cet article s'articule en cinq sections. Après avoir présenté notre approche méthodologique (Section 2), nous explorerons les fondements de l'Industrie 4.0 (Section 3), en retraçant son développement historique, en précisant ses définitions et en mettant en évidence les technologies fondamentales qui la caractérisent. La section 4 constitue le cœur de cette étude : nous y introduisons un cadre de gestion des risques, en explicitant la notion de risque, son processus et les méthodes associées. Dans cette section, nous examinerons la littérature existante sur la catégorisation des risques, ainsi que les différentes méthodes d'analyse et d'évaluation des risques couramment proposées dans la littérature (SWOT, AMDEC/FMEA, AHP, TOPSIS, DEMATEL...), en analysant leurs avantages, leurs limitations et leurs lacunes. Enfin, la section 5 synthétisera l'étude en soulignant les axes de recherche pertinents pour une gestion proactive et performante des risques liés à l'implémentation de l'Industrie 4.0.

2. Les théories mobilisées et les lacunes théoriques

La compréhension et la gestion des risques issus de l'adoption de l'Industrie 4.0 peuvent être éclairées par un cadre théorique combinant des approches issues du management stratégique, de la durabilité et de la contextualisation organisationnelle. La Dynamic Capability View (Teece et al., 1997) constitue un socle pertinent pour analyser la manière dont les entreprises peuvent développer, intégrer et reconfigurer leurs ressources afin de faire face à un environnement technologique instable et fortement interconnecté. Dans le contexte de l'Industrie 4.0, marqué par l'émergence de risques cybernétiques, organisationnels et technologiques, cette théorie permet de concevoir la gestion des risques comme un processus dynamique, reposant sur la capacité d'apprentissage, d'innovation et d'adaptation continue. En complément, la théorie de la contingence (Lawrence & Lorsch, 1967) postule qu'il n'existe pas une méthode unique de management applicable universellement : les stratégies de gestion des risques doivent être contextualisées selon les spécificités de chaque organisation, son secteur d'activité, son niveau de maturité technologique et son environnement réglementaire. Enfin, la théorie du Triple Bottom Line (Elkington, 1997) introduit une perspective holistique et durable en soulignant l'importance de prendre en compte, au-delà des dimensions économiques, les risques environnementaux (consommation énergétique, pollution numérique) et sociaux (emploi, compétences, éthique de l'IA). L'intégration de ces trois cadres permet d'appréhender la gestion des risques liés à l'Industrie 4.0 de manière à la fois stratégique, adaptative et durable, tout en reconnaissant la diversité des contextes d'implémentation.

Bien que ce cadre théorique présente une forte complémentarité entre l'approche stratégique, contextuelle et durable, ces cadres présentent certaines limites qui justifient leur mobilisation conjointe. La Dynamic Capability View reste souvent abstraite et peu opérationnalisée dans le contexte industriel, tandis que la théorie de la contingence n'offre pas toujours des balises claires pour l'adaptation en environnement numérique. De son côté, le Triple Bottom Line peine à être intégré de manière systémique dans les processus de décision stratégique. Ces observations ouvrent la voie à une réflexion approfondie sur l'adaptation concrète de ces approches aux enjeux spécifiques de l'Industrie 4.0.

3. Méthodologie de recherche

- Identification : La revue systématique a été menée en utilisant les bases de données Scopus et Web of Science. Nous avons considéré les publications publiées après l'introduction formelle de l'industrie 4.0 (c'est-à-dire après 2011 jusqu'à 2024). Les requêtes de recherche, ciblant le titre, le résumé et les mots-clés, a utilisé les groupes de termes suivants :

"Industry 4.0" OR "Industrie 4.0" OR "Fourth Industrial Revolution" OR "Quatrième révolution industrielle" OR "Smart Factory" OR "Usine intelligente" ; (2) "Risk Management" OR "Gestion des risques" OR "Risk Assessment" OR "Évaluation des risques" ; (3) "Method*" OR "Méthode*" OR "Approach*" OR "Approche*" OR "Framework*" OR "Cadre*" OR "Strategie*" OR "Stratégie*".

Le premier groupe cible les publications liées au concept d'Industrie 4.0, le deuxième groupe cible les publications traitant de la gestion des risques, et le troisième groupe cible les publications proposant des méthodes, approches, cadres ou stratégies pour la gestion des risques. La recherche s'est limitée aux articles de revues, aux communications de conférence et aux chapitres de livres publiés en anglais ou en français. Initialement, 98 publications ont été identifiées sur Web of Science et 86 sur Scopus, soit un total de 184 publications. Après la suppression des doublons, 151 articles ont été retenus pour l'étape de screening.

- Screening : À ce stade, chaque article a été évalué en fonction de son titre, de son résumé et de ses mots-clés pour déterminer sa pertinence par rapport à la question de recherche : "Quels

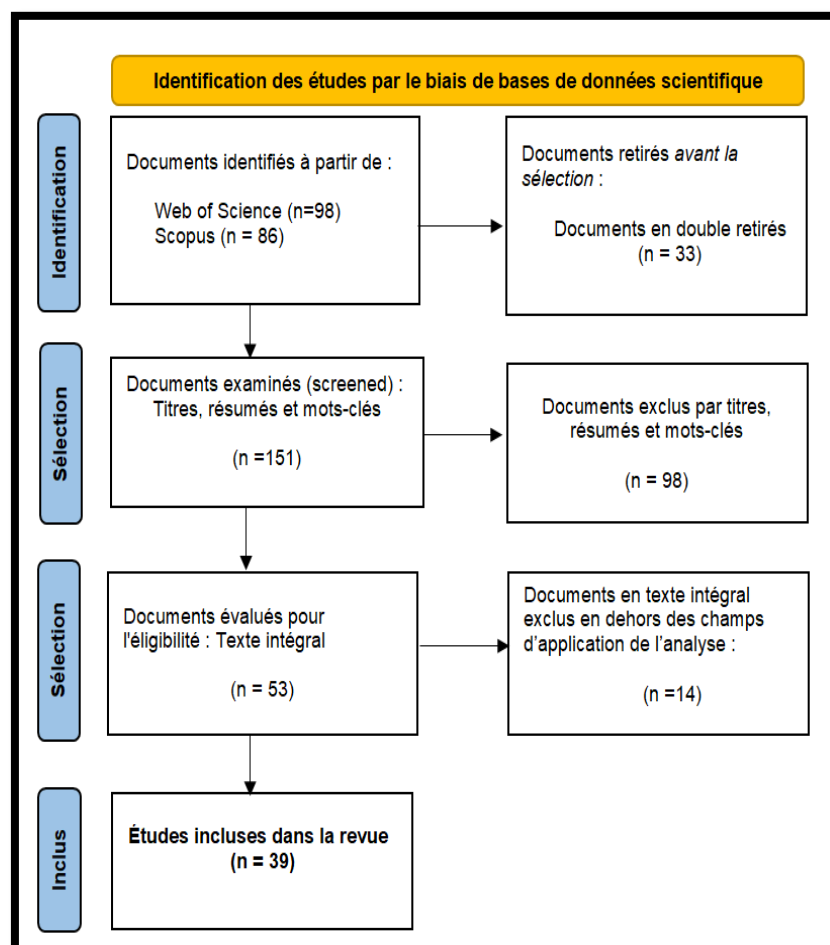
sont les risques liés à la transition vers l'Industrie 4.0 et quelles sont les méthodes de gestion de ces risques proposées dans la littérature ?". Parmi les 151 articles retenus après la suppression des doublons, 98 ont été exclus, car ils ne répondaient pas aux critères d'inclusion : hors sujet (ne traitant pas de l'Industrie 4.0 ou de la gestion des risques) ou focus non pertinent (centré uniquement sur les technologies de l'I4.0 sans aborder la gestion des risques). 53 articles ont été conservés pour l'étape d'éligibilité.

- Éligibilité : Les 53 articles retenus après le screening ont été lus en texte intégral pour évaluer leur adéquation à la question de recherche. Les critères d'inclusion étaient : (1) articles proposant des méthodes, cadres ou stratégies de gestion des risques pour l'Industrie 4.0 ; et (2) articles analysant les types de risques liés à l'implémentation des technologies de l'Industrie 4.0. Les critères d'exclusion étaient : articles hors sujet (ne traitant pas de l'Industrie 4.0 ou de la gestion des risques), articles portant sur la gestion des risques dans un autre contexte que l'Industrie 4.0 (ex. : finance, santé), articles se concentrant uniquement sur les aspects technologiques de l'Industrie 4.0, et articles avec un focus trop technique sans implications managériales pour la gestion des risques. 14 articles ont été exclus, principalement pour ces raisons.

- Inclusion : Finalement, 39 articles ont été inclus dans la revue systématique et ont fait l'objet d'une analyse approfondie. Ces articles ont été jugés pertinents et de qualité suffisante pour répondre à la question de recherche.

La figure N°1, ci-dessous, présente la méthodologie de recherche adoptée, illustrée par un diagramme PRISMA.

Figure N° 1 : Méthodologie de recherche selon le Diagramme PRISMA



Source : Élaboré par les auteurs

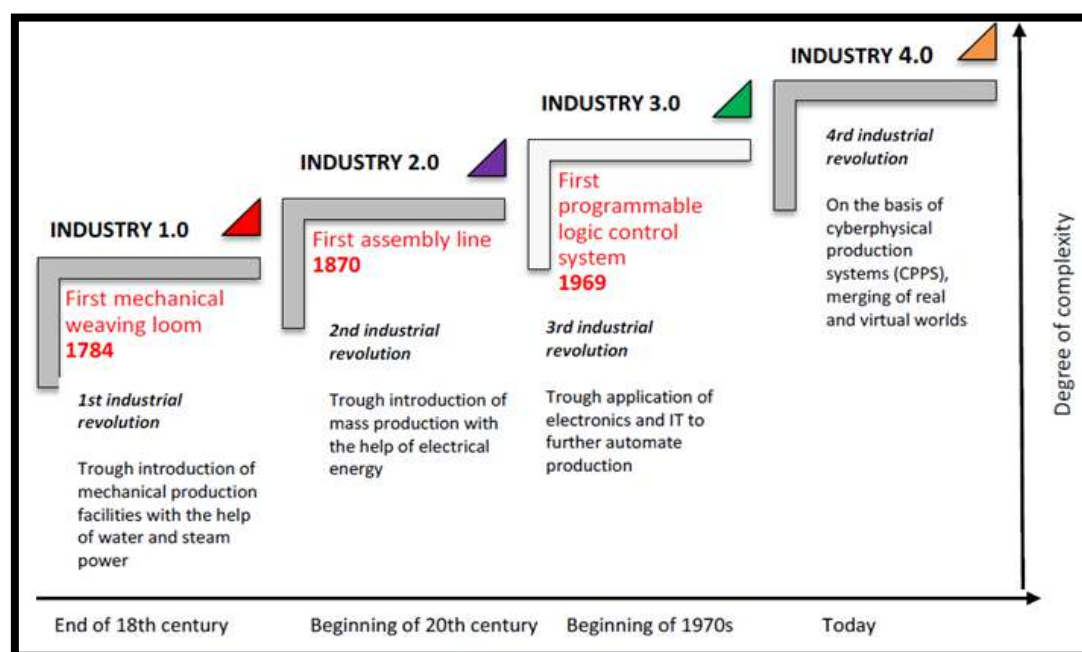
4. Fondements de l'Industrie 4.0

Cette section pose les fondements de l'Industrie 4.0 en examinant son histoire, ses définitions et ses technologies habilitantes. Ce cadre permettra de poser les bases nécessaires à l'analyse des risques et des opportunités liés à ce nouveau paradigme industriel.

4.1. De la vapeur au capteur : Contexte historique de l'industrie 4.0

Les révolutions industrielles représentent des phases distinctes de transformation technologique et socio-économique, chacune définie par des innovations clés qui ont transformé la production, le travail et la structure sociale (voir Figure N°2). L'Industrie 1.0, au XVIII^e siècle, a introduit la mécanisation grâce à la vapeur et à l'hydraulique. Des machines comme le métier à tisser mécanique ont révolutionné la production artisanale, déplaçant la main-d'œuvre agricole vers les manufactures et transformant ainsi les modèles économiques et sociaux (Moeuf, 2018). L'Industrie 2.0, au début du XX^e siècle, s'est caractérisée par la production de masse et l'électrification. L'électricité, le moteur à combustion et la chaîne de montage, popularisés par Henry Ford, ont permis la standardisation et la production à grande échelle, réduisant les coûts et démocratisant l'accès aux biens de consommation (Bauernhansl, Ten Hompel, & Vogel-Heuser, 2014). L'Industrie 3.0, à partir des années 1970, a marqué le début de l'automatisation grâce à l'intégration de l'électronique, de l'informatique et des automates programmables industriels (API). Cette phase a permis d'accroître l'efficacité des processus de production et de poser les bases de l'optimisation par les données (Moeuf, 2018). L'Industrie 4.0, enfin, lancée au XXI^e siècle, se caractérise par l'interconnexion des systèmes via l'IoT et l'analyse de données en temps réel, ce qui facilite l'auto-optimisation des processus et l'émergence d'usines intelligentes. La gestion des données devient centrale, influençant les modèles de production et de consommation (Moeuf, 2018; Bauernhansl, Ten Hompel, & Vogel-Heuser, 2014). L'évolution des révolutions industrielles reflète une accélération continue des avancées technologiques, chaque phase s'appuyant sur les acquis des précédentes. L'Industrie 4.0, en particulier, promet une transformation radicale des modes de production et de consommation, dont les conséquences socio-économiques sont encore difficiles à appréhender pleinement.

Figure N°2 : Perspective historique des révolutions industrielles.



Source: Australian Prime Minister's Industry 4.0 Taskforce, 2018.

4.2. Définition de l'I4.0 : Un concept en constante évolution

Le concept d'Industrie 4.0, présenté en 2011 au salon de Hanovre dans le cadre d'une initiative stratégique du gouvernement allemand pour renforcer la compétitivité nationale, a rapidement suscité un intérêt à l'échelle internationale. Néanmoins, l'absence de définition consensuelle a engendré une diversité d'interprétations (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013), comme le démontre le tableau N°1, ci-dessous :

Tableau N°1 : Synthèse des définitions de l'Industrie 4.0 dans la littérature

Auteur(s)	Année	Définition de l'Industrie 4.0	Focus principal
Moeuf	2018	Mise en réseau optimale des dispositifs d'automatisation intelligents et des systèmes de production, permettant l'auto-optimisation et l'auto-contrôle de l'usine intelligente.	Mise en réseau, automatisation intelligente, auto-optimisation, usine intelligente.
Hermann, Pentek, Otto	2016	Fusion du monde virtuel et réel grâce aux technologies cyber-physiques, créant des systèmes de production intelligents et connectés.	Systèmes cyber-physiques, monde virtuel et réel, production intelligente.
Kagermann, Wahlster, Helbig	2013	Transformation numérique de la fabrication, impliquant l'interconnexion des machines, des systèmes et des personnes, et l'utilisation de données en temps réel pour optimiser la production.	Numérisation, interconnexion, données en temps réel, optimisation de la production.
Schlick et al.	2014	Approche holistique de la fabrication intégrant des technologies telles que l'Internet des objets, le cloud computing et l'analyse de données pour créer des usines intelligentes et flexibles.	Approche holistique, IoT, cloud computing, analyse de données, flexibilité.
Bauernhansl, Ten Hompel, & Vogel-Heuser	2014	Paradigme de production basé sur la mise en réseau des systèmes de production et l'utilisation de données pour l'optimisation et la personnalisation de masse.	Mise en réseau, données, optimisation, personnalisation de masse.
Lee, Bagheri & Kao	2015	Système cyber-physique qui intègre les opérations de fabrication avec des capteurs intelligents, des machines connectées et des analyses de données pour une prise de décision en temps réel.	Système cyber-physique, capteurs intelligents, machines connectées, analyse de données, temps réel.
Lasi et al.	2014	Concept englobant les technologies et les concepts de la chaîne de valeur organisés pour permettre une production intelligente.	Technologies, concepts de chaîne de valeur, production intelligente.

Source : Élaboré par les auteurs.

Les définitions de l'Industrie 4.0 présentées dans ce tableau révèlent un spectre d'interprétations, de l'intégration technologique à la transformation des modèles de production. Certaines mettent l'accent sur les systèmes cyber-physiques et les données (Lee, Bagheri, & Kao, 2015), tandis que d'autres adoptent une approche holistique de la chaîne de valeur (Schlick et al., 2014). Si l'interconnexion et l'exploitation des données sont des points communs, les objectifs varient entre l'optimisation de la production (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013) et la personnalisation de masse (Bauernhansl, Ten Hompel, & Vogel-Heuser, 2014). Ce manque de consensus, bien qu'offrant une flexibilité d'adaptation, peut freiner la mise en œuvre de stratégies cohérentes, soulignant l'importance de maîtriser ces nuances pour tirer parti de l'Industrie 4.0.

En conclusion, l'Industrie 4.0, tout en s'inscrivant dans la continuité des révolutions industrielles, marque une rupture par l'interconnexion et l'intelligence des systèmes. La diversité des interprétations, technologiques ou holistiques, reflète la complexité du concept et offre une flexibilité d'adaptation. Comprendre ces nuances est crucial pour exploiter son potentiel et relever ses défis.

4.3. Technologies habilitantes de l'Industrie 4.0

Cette section explore les technologies clés qui sous-tendent l'Industrie 4.0, en s'appuyant sur les neuf groupes technologiques définis par le Boston Consulting Group (Veza, Mladineo, & Gjeldum, 2015). L'analyse de données massives et analytique (Big Data et Data Analytics) vise à extraire des informations exploitables à partir de grands ensembles de données. Bi et Cochran (2014, p. 253) soulignent que cette analyse, popularisée par Google, repose sur des plateformes comme Hadoop et des algorithmes comme MapReduce pour traiter d'importants volumes de données et optimiser les processus et la prise de décision. La simulation informatique permet de modéliser et d'analyser les performances des systèmes de production, du comportement des produits à la coordination multi-sites, dans le but d'optimiser l'ensemble des processus industriels (Veza, Mladineo, & Gjeldum, 2015). L'Internet des objets (IoT) connecte des objets physiques, du quotidien aux industriels, via des capteurs, des logiciels et des réseaux, permettant la collecte, l'échange et l'exploitation de données en temps réel (Malik et al., 2021, p. 128). Cette interconnexion fournit les données nécessaires à la surveillance, l'automatisation et le contrôle, optimisant l'interaction entre le monde physique et le monde numérique et permettant une prise de décision décentralisée. Les systèmes cyber-physiques (CPS) sont des systèmes intégrés combinant des éléments informatiques et physiques pour interagir en temps réel avec l'environnement. Grâce à des capteurs, des actionneurs et des capacités de communication, de stockage et de calcul embarquées, ils surveillent, contrôlent et s'adaptent aux changements en continu. À la différence de l'IoT, qui collecte et transmet des données, les CPS réagissent et se reconfigurent en temps réel grâce à des algorithmes de contrôle (Öztemel et Gursev, 2020). Le Cloud Computing, selon Kim (2017), offre des services et applications web accessibles sans installation. En stockant les données et les applications sur des serveurs virtuels, il facilite l'accès simultané aux informations, réduit les coûts et simplifie l'infrastructure. Adapté au Big Data et à la robotique connectée, il permet l'analyse de données et la prise de décision efficace. La réalité virtuelle, initialement dédiée aux jeux vidéo, trouve des applications industrielles, notamment pour la formation et l'assistance aux opérateurs, en superposant des informations virtuelles au monde réel (Öztemel et Gursev, 2020). La cybersécurité est essentielle pour protéger les flux de données importants de l'Industrie 4.0, notamment via le Cloud, garantissant la sécurité et la fiabilité des systèmes (Malik et al., 2021). La communication machine à machine (M2M) est l'échange automatisé de données entre machines, sans intervention humaine, via divers canaux (filaires ou sans fil). Elle permet, par exemple, à des capteurs industriels de transmettre des informations à un système de surveillance, facilitant la reconfiguration automatique et la réponse aux incidents, et améliorant l'efficacité et la résilience des systèmes (Öztemel et Gursev, 2020). Enfin, les robots collaboratifs (cobots) sont conçus pour collaborer avec les opérateurs humains, les assistant dans leurs tâches et améliorant l'ergonomie et la sécurité (Kim, 2017). L'Industrie 4.0 repose sur l'exploitation conjointe de ces technologies, accessibles à différents coûts et niveaux de maturité. L'objectif est d'intégrer ces technologies aux systèmes de production pour améliorer leurs performances et leur adaptabilité.

5. Gestion des Risques liés à la Transition vers l'Industrie 4.0 :

Cette partie analyse la gestion des risques inhérents à l'implémentation de l'Industrie 4.0. Elle commence par définir le risque et les méthodes de gestion associées (4.1), selon la description de Berg (2010), puis se penche sur l'identification spécifique des risques propres à ce contexte technologique révolutionnaire I.4.0 (4.2). Enfin, elle détaille les méthodes d'analyse et d'évaluation des risques les plus pertinentes pour une transition sûre et efficace vers l'Industrie 4.0 (4.3).

5.1. Cadre de Gestion des Risques : Notion, Processus et Méthodes Appliquées

5.1.1. Notion de risque et processus de gestion de risque :

Bien que la norme ISO 31000 : 2018 et le travail de Berg (2010) abordent la notion de risque sous des angles légèrement différents, ils partagent un point fondamental : le risque est intrinsèquement lié à l'incertitude et à son influence sur l'atteinte des objectifs fixés. La norme ISO 31000 adopte une définition concise, définissant le risque comme « l'effet de l'incertitude sur l'atteinte des objectifs » (ISO 31000, 2018). Cette définition met l'accent sur la nature même du risque comme une conséquence de l'incertitude, insistant sur le fait que cette incertitude peut entraîner des résultats aussi bien positifs (opportunités) que négatifs (menaces). L'approche de la norme ISO 31000 est donc essentiellement axée sur l'impact de l'incertitude sur la performance globale.

L'approche de Berg (2010) offre une perspective plus détaillée et opérationnelle. Il définit le risque comme « l'incertitude entourant les événements et les résultats futurs ». Cette définition, tout en conservant l'importance de l'incertitude, la contextualise davantage en précisant qu'elle concerne les événements et les résultats futurs, impliquant une dimension temporelle. De plus, Berg (2010) introduit une dimension analytique essentielle en distinguant deux aspects clés du risque : la probabilité de son occurrence et l'ampleur de son impact potentiel. Cette double dimension permet une évaluation plus fine du risque, passant d'une simple appréciation qualitative de l'incertitude à une analyse plus rigoureuse intégrant des éléments quantitatifs (probabilité) et qualitatifs (impact). En conséquence, L'approche de Berg (2010) offre un cadre structuré pour l'évaluation et la gestion des risques, en insistant sur l'importance de l'évaluation des menaces et opportunités, et en fournissant une base solide pour la prise de décision. Elle met en avant la hiérarchisation des risques selon leur probabilité et leur impact, un élément crucial pour l'allocation efficace des ressources et la mise en place de mesures de mitigation. Berg (2010) détaille un processus de gestion des risques en sept étapes interdépendantes. Il commence par l'établissement du contexte et des objectifs de l'organisation, incluant des analyses SWOT et PESTEL, une revue des réglementations, et la consultation des parties prenantes. Cette étape permet de définir des critères de risques spécifiques au contexte organisationnel. L'identification des risques potentiels suit, utilisant des méthodes variées comme le brainstorming, les checklists, l'analyse de scénarios, ou des approches plus formelles comme HAZOP et FMEA. L'analyse des risques évalue ensuite la probabilité et l'impact de chaque risque identifié, en employant des outils comme les matrices de risques et l'AMDEC. Suit l'évaluation des risques, comparant les résultats de l'analyse aux critères de tolérance définis. Si un risque est jugé inacceptable, des actions correctives sont nécessaires. L'étape de traitement des risques propose des stratégies d'évitement, de réduction, de transfert ou de rétention, en tenant compte de l'efficacité des coûts et de la pertinence des mesures (Berg, 2010). La surveillance continue permet de suivre l'évolution des risques, l'efficacité des traitements et d'identifier de nouveaux risques. Enfin, la communication transparente sur l'ensemble du processus est essentielle. Ce processus itératif et adaptatif est particulièrement pertinent face à la complexité de l'Industrie 4.0 et à l'interconnexion croissante des systèmes (Tupa et al., 2017). En effet, une gestion proactive des risques, telle que décrite par Berg, est cruciale pour une transition réussie vers l'I4.0 et l'atteinte des objectifs de performance (Colak, Kaya, & Erdogan, 2019).

5.1.2. Approches méthodologiques pour l'analyse et l'évaluation des risques liés à l'I4.0 :

L'analyse et l'évaluation des risques liés à l'Industrie 4.0 requièrent des approches méthodologiques robustes, capables de saisir la complexité de ce paradigme technologique. Ces méthodes se divisent généralement en deux grandes catégories : qualitatives et quantitatives. Toutefois, une approche holistique combinant ces deux types de méthodes

s'avère souvent indispensable pour appréhender l'ensemble des risques associés à l'I4.0 (Gadekar, Sarkar, & Gadekar, 2022a). Parmi les méthodes qualitatives, l'analyse SWOT (Puyt, Lie et Wilderom, 2023) permet d'identifier les forces, faiblesses, opportunités et menaces spécifiques à l'implémentation de l'Industrie 4.0. Dans ce contexte, les forces peuvent inclure les capacités d'innovation, l'infrastructure technologique et les compétences numériques, tandis que les faiblesses concernent la dépendance aux systèmes hérités, le manque de compétences en cybersécurité et la résistance au changement. En parallèle, les opportunités résident dans l'accès à de nouveaux marchés, l'amélioration de l'efficacité opérationnelle et la création de nouveaux produits ou services, alors que les menaces sont représentées par les risques de cybersécurité, l'obsolescence technologique rapide et l'intensification de la concurrence. Le modèle PESTEL (Issa et Issa, 2014), quant à lui, offre une lecture macro-environnementale des facteurs influençant l'adoption de l'I4.0, en examinant les dimensions politiques (ex. : politiques d'innovation, réglementation sur les données), économiques (ex. : conjoncture, investissements), sociales (ex. : évolution du marché du travail, acceptation des technologies), technologiques (ex. : maturité des solutions numériques), environnementales (ex. : impact écologique et normes afférentes) et légales (ex. : cybersécurité, propriété intellectuelle). En complément, les méthodes quantitatives visent à mesurer et hiérarchiser les risques identifiés. L'AMDEC, fondée sur la norme NF EN IEC 60812, constitue un outil systématique pour identifier les modes de défaillance potentiels, analyser leurs effets, en déterminer les causes et calculer un indice de priorité des risques (IPR) en vue d'orienter les actions correctives. Cette méthode est particulièrement adaptée aux environnements complexes et interconnectés de l'I4.0, bien que sa mise en œuvre puisse s'avérer techniquement exigeante. Enfin, les méthodes d'aide multicritère à la décision (MCDM), telles que l'AHP, le TOPSIS et le VIKOR, sont utilisées pour évaluer différentes alternatives en prenant en compte plusieurs critères souvent conflictuels comme les coûts, les bénéfices, la sécurité ou encore la performance (Gadekar, Sarkar, & Gadekar, 2022a ; Triantaphyllou et Triantaphyllou, 2000). L'AHP structure les décisions sous forme hiérarchique, le TOPSIS classe les solutions selon leur proximité à une alternative idéale, tandis que le VIKOR propose un compromis basé sur un équilibre entre satisfaction et regret. Ainsi, la combinaison de ces outils permet une évaluation rigoureuse et adaptée des risques dans le cadre de l'Industrie 4.0.

5.2. Identification des Risques liés à l'Industrie 4.0

L'Industrie 4.0, marquée par l'interconnexion, la digitalisation et l'automatisation des systèmes de production, engendre une transformation profonde du paysage industriel. Si cette révolution technologique promet des gains de productivité et d'innovation significatifs, elle s'accompagne également de nouveaux risques (Lasi et al., 2014). L'identification de ces risques, étape préliminaire et cruciale du processus de gestion des risques, permet d'anticiper les menaces potentielles et de mettre en place des stratégies de mitigation efficaces. Cette revue de littérature explore les différentes approches d'identification des risques liées à l'Industrie 4.0, afin de dresser un état d'art des connaissances actuelles.

Une première approche, privilégiée par Tupa et al. (2017), se concentre sur les risques opérationnels, les auteurs identifient les risques liés aux processus de fabrication, à la maintenance, à la gestion des ressources humaines, aux machines et, en particulier, à la sécurité informatique, un aspect crucial dans un environnement interconnecté. Cette approche pragmatique, axée sur les aspects concrets de l'usine intelligente, permet aux entreprises d'identifier les vulnérabilités potentielles au niveau opérationnel et de mettre en place des mesures de mitigation ciblées. Des travaux comme ceux de Khalid et al. (2020) complètent cette perspective en proposant une analyse des modèles de maturité et des risques de cybersécurité dans l'industrie 4.0.

Une seconde approche, plus holistique, intègre les principes de la durabilité dans l'identification des risques. Birkel et al. (2019), en utilisant le cadre du Triple Bottom Line (TBL), proposent une catégorisation des risques selon les dimensions économiques, environnementales, sociales et technologiques. Cette approche permet d'évaluer l'impact global de l'Industrie 4.0 sur l'entreprise, ses parties prenantes et l'environnement. Les risques économiques (investissements, concurrence), écologiques (consommation, pollution), sociaux (emplois, compétences) et technologiques sont ainsi analysés en profondeur, permettant aux décideurs d'adopter une vision stratégique et à long terme. Soltovski et al. (2021) confirment la pertinence de cette approche holistique en proposant une catégorisation similaire basée sur le TBL. De plus, Ivanov, Dolgui et Sokolov (2019) enrichissent cette perspective en analysant les risques liés à la chaîne d'approvisionnement, notamment l'effet domino, conséquence directe de l'interconnexion accrue des systèmes. Similairement, Gadekar, Sarkar et Gadekar (2022a) adoptent une approche holistique, mais structurent l'identification des risques grâce au modèle Iceberg et aux catégories PEEST (Politique, Économique, Écologique, Social, Technologique). Le modèle Iceberg de Gadekar, Sarkar et Gadekar (2022a), combiné à l'analyse PEEST, identifie à la fois les risques visibles (ex: défaillances technologiques) et les risques cachés (ex: manque de compétences, implications légales) liés à l'Industrie 4.0. Cette approche multidimensionnelle complète les analyses traditionnelles centrées sur les risques apparents.

Enfin, certains travaux se concentrent sur les défis spécifiques rencontrés par certaines catégories d'entreprises. Moeuf et al. (2019), par exemple, se focalisent sur les risques liés à la transformation numérique des PME, soulignant le manque d'expertise, la difficulté de planifier à long terme et les contraintes organisationnelles. Schumacher, Erol et Sihn (2016) proposent quant à eux un modèle de maturité pour évaluer la préparation à l'Industrie 4.0 et identifier les risques d'implémentation. Par ailleurs, Oesterreich et Teuteberg (2016) explorent les risques liés aux facteurs humains et sociétaux, tandis que Sisinni et al. (2018) se penchent sur les défis et opportunités liés à l'Internet Industriel des Objets (IIoT).

En somme, cette revue de littérature met en lumière la diversité des approches pour identifier les risques liés à l'Industrie 4.0, allant de perspectives opérationnelles et pragmatiques à des approches plus holistiques et stratégiques, en passant par des analyses contextuelles centrées sur des types d'entreprises spécifiques. La complémentarité de ces travaux permet de mieux appréhender la complexité des risques inhérents à la quatrième révolution industrielle et d'orienter les recherches futures vers une gestion des risques plus intégrée et plus efficace.

Après ce panorama des différents travaux sur l'identification des risques liés à l'Industrie 4.0, nous allons nous concentrer plus particulièrement sur les contributions de Birkel et al. (2019) pour leur approche holistique intégrant la durabilité via le TBL, et ceux de Tupa et al. (2017) pour leur focus opérationnel, particulièrement utile aux gestionnaires confrontés aux risques quotidiens de l'usine connectée. Ces études, sélectionnées pour leur complémentarité, offrent une compréhension multidimensionnelle des risques de l'Industrie 4.0, que nous détaillerons à travers leurs catégories respectives :

L'approche de Tupa et al est pragmatique et axée sur les opérations. Elle se concentre sur les risques concrets et immédiats liés à la mise en œuvre de l'Industrie 4.0 dans l'environnement de production. La catégorisation est relativement simple et facile à comprendre pour les gestionnaires opérationnels. Cependant, elle est moins exhaustive que d'autres approches, notamment celles basées sur le Triple Bottom Line, car elle ne prend pas en compte les aspects plus larges de la durabilité (économique, environnemental, social). Néanmoins, sa focalisation sur la sécurité informatique est un atout important, compte tenu des enjeux croissants de la cybersécurité dans l'industrie connectée. Le tableau ci-dessous présente une classification des risques opérationnels selon Tupa et al. (2017).

Tableau N°2 : Identification des nouveaux risques liés à l'Industrie 4.0 selon Tupa et al. (2017)

Catégories de risque opérationnel	Risque
Gestion des processus de fabrication	Risque d'information associé à la perte de données, à la perte d'intégrité et à la perte d'informations disponibles.
Maintenance	Problème de disponibilité et d'intégrité des données pour la maintenance.
Méthodes et outils d'exploitation	Traitement des données relatives aux erreurs.
Machines et technologies de fabrication	Sensibilité et vulnérabilité des données - problème lié aux cyber-attaques.
Ressources humaines	Faible nombre de personnels qualifiés
Environnement des machines	Attaques provenant du réseau Internet, problèmes liés à la compatibilité électromagnétique et aux émissions électromagnétiques affectant les machines de production.

Source : Tupa et al. (2017)

L'étude de Birkel et al. (2019) se démarque par une approche globale de l'identification des risques liés à l'Industrie 4.0, en mobilisant le cadre du Triple Bottom Line (TBL), qui prend en compte les dimensions économiques, environnementales et sociales. Cette méthode permet de mieux appréhender les impacts de la transformation numérique sur l'ensemble de l'écosystème entrepreneurial. Sur le plan économique, les auteurs soulignent que l'adoption des technologies de l'Industrie 4.0 constitue un investissement lourd, en particulier pour les PME. Les coûts initiaux élevés, les retours sur investissement incertains et les longues périodes d'amortissement représentent des défis majeurs. De plus, l'accès aux ressources nécessaires — qu'il s'agisse de matières premières ou de compétences en technologies de l'information — est souvent limité (Kiel et al., 2017). La transformation numérique implique également une adaptation complexe des modèles d'affaires, comme le montre Müller et al. (2018), tandis que la transparence accrue des données intensifie la concurrence. Enfin, la dépendance à des partenaires externes pour l'expertise technologique constitue un facteur de vulnérabilité supplémentaire. S'agissant des risques écologiques, l'Industrie 4.0 soulève des préoccupations importantes en matière de consommation énergétique et de ressources. L'utilisation intensive de technologies nécessite davantage de matières premières et génère plus de déchets, notamment en raison du renouvellement accéléré des machines (Gabriel & Pessel, 2016). Par ailleurs, la personnalisation de masse rend le recyclage plus complexe, ce qui alourdit l'empreinte environnementale globale (Stock et al., 2018). Du point de vue social, l'introduction de technologies avancées modifie profondément les dynamiques de travail. L'automatisation menace les emplois peu qualifiés, tandis que de nouvelles compétences sont exigées, créant un besoin accru en formation (Piccarozzi et al., 2018). Cela entraîne aussi du stress et du surmenage chez les employés, en plus de poser des défis en matière de gestion du changement organisationnel. La culture d'entreprise, le leadership, ainsi que des enjeux éthiques liés à l'intelligence artificielle, comme la confiance ou la responsabilité, deviennent cruciaux. À cela s'ajoute le risque de délocalisation de la production vers des régions à moindre coût (Müller, Dotzauer & Voigt, 2017). Par ailleurs, les risques technico-informatiques sont au cœur des préoccupations. L'intégration des nouveaux systèmes, leur interopérabilité, et la fiabilité de l'infrastructure technique représentent des défis de taille (Veza et al., 2015). Dans un environnement ultra-connecté, les risques liés à la cybersécurité, à la souveraineté des données et aux fuites d'informations sensibles se multiplient (Tamvada et al., 2022). Une infrastructure robuste, notamment dans le cloud computing, est donc essentielle, tout comme la gestion des dépendances technologiques. Enfin, les risques juridico-politiques viennent compléter cette cartographie. Un cadre législatif adapté est nécessaire pour réguler les transformations induites par l'Industrie 4.0 (Gadekar et al., 2022a). Cela implique des clarifications sur la protection des données, la régulation du temps de travail, la juridiction applicable aux transactions transfrontalières, ainsi que la sécurité et la santé des travailleurs. De plus, le manque de normes internationales harmonisées peut

entraver la coopération entre pays et ralentir l'adoption des innovations. Le soutien gouvernemental reste donc un levier essentiel pour accompagner cette transition.

5.3. Méthodes d'analyse et évaluation des Risques dans l'Industrie 4.0

La littérature sur l'analyse et l'évaluation des risques liés à l'implémentation de l'Industrie 4.0 présente une diversité d'approches méthodologiques (Gadekar, Sarkar, & Gadekar, 2022b, Colak, Kaya, & Erdogan, 2019, Keskin et al. (2018), Bhagawati et al. (2019), Kou et al. (2019), Kazancoglu & Ozkan-Ozen (2018), Medić et al. (2018), Peruzzini et al. (2018), ...etc). Le tableau N°3 présente une synthèse de ces études et les méthodes utilisées pour analyser et évaluer les risques liés à la mise en œuvre de l'industrie 4.0. Ces méthodes, souvent appliquées dans le cadre de la norme ISO 31000 pour la gestion des risques, incluent notamment l'AMDEC, ainsi que diverses méthodes issues de l'approche MCDM (AHP, TOPSIS, DEMATEL, FAHP, FTOPSIS, ...etc.).

Colak, Kaya et Erdogan (2019) proposent un modèle d'analyse des risques pour la transition vers l'Industrie 4.0, intégrant divers aspects (processus de fabrication, outils opérationnels, technologies de production, ressources humaines, environnement des machines). Les auteurs utilisent une approche MCDM basée sur la logique floue, combinant l'AHP flou de type 2 intervallaire et la TOPSIS floue hésitante. Leurs résultats permettent de hiérarchiser les risques et les critères d'évaluation, offrant une vision structurée des défis liés à la transition. L'étude montre que le critère de sécurité de l'information est le plus important (poids de 0,3321 après défloutage), soulignant le rôle crucial de la protection des données et des systèmes dans l'Industrie 4.0. À l'inverse, le critère de conception est le moins important (poids de 0,0333). Cette hiérarchie permet de prioriser l'allocation des ressources et les efforts de mitigation. L'analyse TOPSIS floue hésitante classe les risques selon un indice de proximité (C_i) à la solution idéale. Colak, Kaya et Erdogan (2019) ont proposé un modèle dLes risques liés à la gestion des processus de fabrication sont identifiés comme les plus critiques ($C_i = 0,782$), suggérant que les entreprises doivent concentrer leurs efforts sur l'optimisation et la sécurisation de ces processus pour minimiser les risques de la transition. Ce classement, du plus au moins critique, met en évidence les points suivants : la gestion des processus de fabrication représente le risque le plus critique, nécessitant une attention particulière sur l'optimisation et la sécurité ; la sécurité de l'information est cruciale, justifiant des investissements importants en cybersécurité ; la conception représente le risque le moins important selon cette analyse ; et les risques liés aux ressources humaines sont perçus comme moins problématiques dans le cadre de la transition vers l'Industrie 4.0. Ce classement fournit ainsi aux entreprises une feuille de route pour la gestion des risques, leur permettant de se concentrer sur les aspects les plus critiques.

Malgré ses contributions, l'étude présente plusieurs limites. En effet, la méthode repose fortement sur les jugements de quatre experts. La représentativité de ces experts et la potentialité de biais dans leurs évaluations restent une source d'incertitude. Une plus grande taille d'échantillon d'experts pourrait améliorer la robustesse des résultats. Ainsi, le choix des critères et des alternatives de risque est basé sur une revue de littérature et une approche Delphi, et peut donc ne pas être exhaustif. D'autres risques, non considérés dans cette étude, pourraient être pertinents pour certaines entreprises ou secteurs spécifiques. Une analyse plus large et une validation empirique plus poussée seraient souhaitables. Par ailleurs, certains critères, comme la qualité et l'interopérabilité, peuvent être difficilement quantifiés. La traduction de ces aspects qualitatifs en données numériques pour l'AHP peut introduire une certaine subjectivité et affecter la précision des résultats. Bien que l'étude fournisse un cadre utile, la généralisation des résultats à toutes les entreprises et à tous les contextes industriels doit être prudente. Les spécificités de chaque secteur et de chaque entreprise doivent être prises en compte lors de l'application de cette méthodologie. En fin, l'étude manque d'une

validation empirique des résultats. Une étude de cas plus approfondie ou une analyse sur données réelles serait nécessaire pour valider la pertinence du modèle proposé.

Deux études récentes ont contribué significativement à l'avancement de la gestion des risques liés à l'Industrie 4.0 : Soltanali et Ramezani (2023) et Gadekar, Sarkar et Gadekar (2022b), abordent l'évaluation des risques dans le contexte de l'Industrie 4.0, mais avec des perspectives et des méthodologies distinctes. Soltanali et Ramezani (2023) se concentrent sur l'AMDEC, proposant une approche hybride combinant la méthode classique avec des techniques avancées telles que l'analyse des arbres de défaillances, les MCDM et l'IA, notamment pour les systèmes critiques de l'industrie automobile. Leur contribution réside dans l'amélioration de l'AMDEC classique et la proposition d'une plateforme intelligente pour automatiser la surveillance des risques. Gadekar, Sarkar et Gadekar (2022b), quant à eux, développent un modèle d'évaluation des risques spécifiquement pour la mise en œuvre de l'I4.0, basé sur des indicateurs clés de performance (KPI). Leur approche combine les méthodes Fuzzy DEMATEL et ARAS étendu avec IVTFN pour analyser les relations de causalité entre les KPIs et classer les risques, prenant en compte l'incertitude et le flou des jugements d'experts. La contribution principale de Gadekar, Sarkar et Gadekar (2022b) réside dans l'intégration des KPIs dans l'évaluation des risques et l'application combinée de deux méthodes MCDM floues pour une analyse plus robuste et nuancée. Les deux études soulignent l'importance d'une approche systématique et d'outils avancés pour gérer les risques liés à l'I4.0, mais la première se concentre sur le raffinement d'une méthode établie (AMDEC), tandis que la seconde propose un nouveau modèle basé sur les KPIs.

En résumé, les études analysées démontrent une diversité d'approches pour étudier la gestion des risques dans la transition vers l'industrie 4.0. Bien que des outils comme AMDEC et MCDM (AHP, TOPSIS, DEMATEL) et SWOT soient utilisés avec succès pour aborder des aspects spécifiques, aucune étude ne fournit une solution exhaustive. La nécessité d'approches plus holistiques, intégrant une analyse plus approfondie des risques (notamment les risques durables et les interdépendances), une considération plus large des critères et une validation empirique des modèles proposés, est clairement mise en évidence. Des recherches futures devraient se concentrer sur le développement de cadres intégrés, tenant compte de la complexité des interactions entre les différents facteurs et les incertitudes inhérentes à la transition vers l'industrie 4.0.

En fait, chaque étude apporte une contribution spécifique à la recherche sur la gestion des risques liés à l'Industrie 4.0. Par exemple, Keskin et al. (2018) proposent un outil d'auto-diagnostic, Colak, Kaya et Erdogan (2019) un cadre d'évaluation multicritère, et Gadekar, Sarkar et Gadekar (2022b) un modèle basé sur les indicateurs clés de performance (KPI). Les recherches futures dans ce domaine devraient se concentrer sur plusieurs axes : la validation empirique des modèles existants, l'intégration de différentes méthodes et perspectives, le développement de modèles plus holistiques et contextuels, l'exploration de l'apprentissage automatique pour l'analyse prédictive des risques, et enfin, la prise en compte des aspects humains et organisationnels.

Tableau N°3 : Revue de la littérature sur l'analyse et l'évaluation des risques liés à l'Industrie 4.0

Référence	Méthode(s) d'analyse de risque utilisée(s)	Forces de la méthode/de l'étude	Limites et futures recherches	Contributions
Gadekar, Sarkar, & Gadekar, 2022b	Fuzzy DEMATEL, ARAS étendu avec IVTFN	Modèle intégré et durable basé sur les KPIs ; Prise en compte de l'incertitude et du flou ; Analyse des relations de cause à effet entre les KPIs ; Identification des KPIs et risques clés.	Focalisation sur le contexte indien ; Subjectivité des jugements d'experts ; Nécessité de validation dans d'autres contextes.	Proposition d'un modèle d'évaluation des risques I4.0 basé sur les KPIs et combinant deux méthodes MCDM floues ; Identification des KPIs et risques clés ; Mise en évidence de l'importance de l'infrastructure IT et des capacités de prédiction.
Keskin et al. (2018)	Questionnaire d'auto-évaluation de la maturité de l'industrie 4.0 (basé sur 8 dimensions)	Simplicité d'utilisation, permet une auto-évaluation rapide.	Subjectivité de l'auto-évaluation, manque de validation externe. Futures recherches : Comparer avec évaluations externes, développer des indicateurs plus précis.	Évaluer le niveau de maturité des entreprises pour l'adoption de l'I4.0. Apport : Outil d'auto-diagnostic.
Colak, Kaya, & Erdogan, (2019)	Interval Type-2 Fuzzy AHP, Hesitant Fuzzy TOPSIS (Données d'expert)	Approche hybride, gestion de l'incertitude, prise en compte de l'hésitation des experts.	Subjectivité des données d'expert, complexité, manque de validation empirique. Futures recherches : Validation avec données réelles, comparaison avec d'autres méthodes, étude de sensibilité.	Évaluer les risques et opportunités de l'I4.0 dans les PME. Apport : Cadre d'évaluation multicritère.
Bhagawati et al. (2019)	Fuzzy DEMATEL (Données d'expert)	Identification des relations de cause à effet, prise en compte de l'incertitude.	Subjectivité des données d'expert, difficulté de validation. Futures recherches : Combiner DEMATEL avec d'autres méthodes, validation empirique.	Identifier les facteurs critiques de succès pour une chaîne d'approvisionnement durable dans l'I4.0. Apport : Identification des relations de causalité.
Kou et al. (2019)	Méthodes d'apprentissage automatique (Machine Learning)	Permet une analyse systémique des risques. Validée avec des données bancaires réelles.	Manque d'analyse des politiques liées à la science des données. Recherches futures pourraient explorer les approches basées sur les données, l'analyse du Big Data, et l'intégration des politiques de données. Application directe à l'industrie 4.0 non démontrée.	Analyse des risques systémiques dans le secteur financier, potentiellement applicable à l'industrie 4.0 par l'analyse prédictive des données massives.
Kazancoglu & Ozkan-Ozen (2018)	Fuzzy DEMATEL	Développement d'un modèle structurel pour identifier les critères de sélection de la main-d'œuvre dans l'environnement de l'Industrie 4.0. Proposition d'une feuille de route pour la gestion des opérations.	L'étude pourrait être étendue à d'autres secteurs d'activité et des méthodes complémentaires comme CRITIC ou Best Worst pourraient être utilisées pour comparaison.	Fournit un cadre pour la gestion des ressources humaines dans le contexte de l'Industrie 4.0, en identifiant les compétences clés nécessaires. Contribue indirectement à la gestion des risques liés aux compétences et à la pénurie de main-d'œuvre qualifiée.

Medić et al. (2018)	FAHP, PROMETHEE	Évaluation des technologies numériques avancées et de leur contribution à l'Industrie 4.0. Approche hybride floue MCDM.	D'autres MCDM comme EDAS, MABAC pourraient être testées. L'utilisation des technologies numériques dans le suivi client et l'interaction pourrait être considérée comme alternative.	Évaluation de l'impact des technologies numériques sur la compétitivité des entreprises manufacturières dans le contexte de l'Industrie 4.0.
Peruzzini et al. (2018)	DEMATEL, PROMETHEE	Analyse de l'interopérabilité organisationnelle dans l'industrie 4.0. Cas appliqué à la chaîne d'approvisionnement automobile.	Facteurs clés de l'industrie 4.0 (cybersécurité, gestion des risques, connectivité réseau) non considérés. Méthodes FARE, CRITIC, Best Worst pourraient être testées.	Amélioration de la prise de décision en matière d'interopérabilité organisationnelle dans l'Industrie 4.0.
Kou, Peng, & Wang, (2014)	TOPSIS, DEA,VIKOR	Application de six algorithmes de clustering et de trois méthodes MCDM pour l'analyse des risques financiers.	Comparaison de trois méthodes MCDM pour le classement des algorithmes.	Gestion des classements contradictoires obtenus par les méthodes MCDM. La grande taille des ensembles de données peut être considérée pour des résultats plus précis.

Source : Élaboré par les auteurs.

6. Conclusion

Cette revue systématique s'est intéressée à la gestion des risques liés à la transition vers l'Industrie 4.0, en se concentrant sur les approches méthodologiques identifiées dans la littérature. Notre analyse de 39 publications, sélectionnées via une méthodologie rigoureuse (PRISMA), a révélé une complexité inhérente à la gestion des risques dans ce nouvel environnement industriel. L'Industrie 4.0, avec son interconnexion accrue des systèmes, sa dépendance aux données et son rythme d'innovation rapide, engendre de nouveaux risques qui dépassent les cadres traditionnels de gestion du risque.

Nos résultats mettent en évidence la diversité des approches méthodologiques employées pour identifier et analyser ces risques. Des méthodes classiques comme l'AMDEC (FMEA) et le SWOT conservent une certaine utilité, notamment pour l'identification initiale des risques et l'analyse des forces et faiblesses des organisations. Cependant, elles se révèlent souvent limitées face aux défis spécifiques de l'Industrie 4.0, tels que l'interconnexion des systèmes, la dépendance aux données, l'automatisation accrue et le rythme rapide de l'innovation. Ces méthodes peinent notamment à saisir la complexité des interactions entre les différents risques et à appréhender l'incertitude inhérente à cet environnement dynamique.

Les approches MCDM (AHP, TOPSIS, DEMATEL, etc.) offrent une structure plus sophistiquée pour hiérarchiser les risques et prendre des décisions éclairées, notamment dans le cas de critères multiples et souvent conflictuels. Cependant, même ces méthodes avancées présentent des limitations, en particulier en ce qui concerne la quantification de l'incertitude et la prise en compte des risques interdépendants. L'émergence d'approches "intelligentes", intégrant l'intelligence artificielle et le Big Data laisse entrevoir des possibilités d'améliorer la prévision et la gestion des risques. Toutefois, ces approches nécessitent des développements futurs et une validation empirique rigoureuse avant une adoption généralisée.

De plus, notre analyse a mis en lumière l'importance d'une approche holistique et multidimensionnelle est également mise en évidence. L'intégration des dimensions économiques, environnementales et sociales (Triple Bottom Line), ainsi que la prise en compte des spécificités des PME, sont essentielles pour une gestion des risques efficace et durable. Les futurs travaux de recherche devraient se concentrer sur le développement de cadres intégrés combinant méthodes classiques et innovantes, comme l'intégration de l'IA et de l'analyse prédictive. Des études comparatives des différentes approches MCDM et des validations empiriques dans des contextes industriels variés sont également nécessaires.

En définitive, cette revue systématique souligne le besoin urgent de développer des cadres intégrés de gestion des risques pour l'Industrie 4.0. Ces cadres devraient : (1) combiner des méthodes classiques et innovantes, intégrant l'IA et l'analyse prédictive ; (2) adopter une perspective holistique, tenant compte des interdépendances entre les différents types de risques et de leurs impacts à long terme ; (3) proposer des solutions concrètes et opérationnelles, adaptées aux besoins spécifiques des différentes tailles d'entreprises et des secteurs d'activité ; et (4) faire l'objet de validations empiriques rigoureuses pour garantir leur efficacité et leur robustesse. Seule une approche proactive et adaptative, prenant en compte la dynamique et l'incertitude inhérentes à l'Industrie 4.0, permettra aux entreprises de tirer pleinement profit de cette transformation tout en minimisant les risques associés.

Références :

- (1). Bahrin, M. A. K., Othman, M. F., Azli, N. H. N., & Talib, M. F. (2016). Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. *Jurnal teknologi*, 78(6-13).
- (2). Bauernhansl, T., Ten Hompel, M., & Vogel-Heuser, B. (Eds.). (2014). *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung• Technologien• Migration* (pp. 1-648). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- (3). Berg, H. P. (2010). Risk management: procedures, methods and experiences. *Reliability: Theory & Applications*, 5(2 (17)), 79-95.
- (4). Bhagawati, M. T., Manavalan, E., Jayakrishna, K., & Venkumar, P. (2019). Identifying key success factors of sustainability in supply chain management for industry 4.0 using DEMATEL method. In *Proceedings of international conference on intelligent manufacturing and automation: ICIMA 2018* (pp. 583-591). Springer Singapore.
- (5). Bi, Z., & Cochran, D. (2014). Big data analytics with applications. *Journal of Management Analytics*, 1(4), 249-265.
- (6). Birkel, H. S., Veile, J. W., Müller, J. M., Hartmann, E., & Voigt, K. I. (2019). Development of a risk framework for Industry 4.0 in the context of sustainability for established manufacturers. *Sustainability*, 11(2), 384.
- (7). Bonekamp, L., & Sure, M. (2015). Consequences of Industry 4.0 on human labour and work organisation. *Journal of business and media Psychology*, 6(1), 33-40.
- (8). Colak, M., Kaya, I., & Erdogan, M. (2019). A fuzzy based risk evaluation model for Industry 4.0 transition process. In *Industrial Engineering in the Big Data Era: Selected Papers from the Global Joint Conference on Industrial Engineering and Its Application Areas, GJCIE 2018, June 21–22, 2018, Nevsehir, Turkey* (pp. 201-215). Springer International Publishing.
- (9). Demircan Keskin, F., Kabasakal, İ., Kaymaz, Y., & Soyuer, H. (2019). An assessment model for organizational adoption of industry 4.0 based on multi-criteria decision techniques. In *Proceedings of the International Symposium for Production Research 2018* 18 (pp. 85-100). Springer International Publishing.
- (10). Drath, H., & Horch, A. (2014). Industry 4.0: Hit or hype? *Industry forum. IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8(2), 56–58.
- (11). Dutzler, H., Schrauf, S., Müller, R., Wetmore, M., Tang, G., Scharff, C., ... & Baldinger, G. (2018). *How industry leaders build integrated operations ecosystems to deliver end-to-end customer solutions*. PwC, UK.
- (12). Esposito, M., & Kapoor, A. (2022). *the Emerging Economies under the dome of the Fourth industrial revolution*. Cambridge University Press.
- (13). Gabriel, M., & Pessl, E. (2016). Industry 4.0 and sustainability impacts: Critical discussion of sustainability aspects with a special focus on future of work and ecological consequences. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 14(2), 131.
- (14). Gadekar, R., Sarkar, B., & Gadekar, A. (2022a). Assessment of risks for successful implementation of Industry 4.0. *Recent Advances in Computer Science and Communications (Formerly: Recent Patents on Computer Science)*, 15(1), 111-130.
- (15). Gadekar, R., Sarkar, B., & Gadekar, A. (2022b). Key performance indicator based dynamic decision-making framework for sustainable Industry 4.0 implementation risks evaluation: Reference to the Indian manufacturing industries. *Annals of Operations Research*, 318(1), 189–249.
- (16). Hutchins, G. (2018). *ISO 31000: 2018 enterprise risk management*. Greg Hutchins.
- (17). Issa, T., & Issa, T. (2014). Sustainable business strategies and PESTEL framework. *GSTF Journal on Computing (JoC)*, 1(1).

- (18). Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2019). The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. *International journal of production research*, 57(3), 829-846.
- (19). Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group. *Forschungsunion*.
- (20). Kazancoglu, Y., & Ozkan-Ozen, Y. D. (2018). Analyzing Workforce 4.0 in the Fourth Industrial Revolution and proposing a road map from operations management perspective with fuzzy DEMATEL. *Journal of enterprise information management*, 31(6), 891-907.
- (21). Khalid, H., Hashim, S. J., Ahmad, S., Hashim, F., & Chaudary, M. A. (2020). Cybersecurity in Industry 4.0 context: Background, issues, and future directions. *The nine pillars of technologies for industry*, 4, 263-307.
- (22). Kiel, D., Müller, J. M., Arnold, C., & Voigt, K. I. (2017). Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of industry 4.0. *International journal of innovation management*, 21(08), 1740015.
- (23). Kiel, D., Müller, J. M., Arnold, C., & Voigt, K. I. (2017). Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of Industry 4.0. *International Journal of Innovation Management*, 21(2), 1740015.
- (24). 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.
- (25). Kou, G., Chao, X., Peng, Y., Alsaadi, F. E., & Herrera Viedma, E. (2019). Machine learning methods for systemic risk analysis in financial sectors.
- (26). Kou, G., Peng, Y., & Wang, G. (2014). Evaluation of clustering algorithms for financial risk analysis using MCDM methods. *Information sciences*, 275, 1-12.
- (27). Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 6, 239-242.
- (28). Lee, I., & Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business horizons*, 58(4), 431-440.
- (29). Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- (30). Malik, P. K., Sharma, R., Singh, R., Gehlot, A., Satapathy, S. C., Alnumay, W. S., ... & Nayak, J. (2021). Industrial Internet of Things and its applications in industry 4.0: State of the art. *Computer Communications*, 166, 125-139.
- (31). Medić, N., Marjanović, U., Prester, J., Palčić, I., & Lalić, B. (2018). Evaluation of advanced digital technologies in manufacturing companies: Hybrid fuzzy MCDM approach. In 25th EurOMA conference (pp. 1-10). <https://www.researchgate.net/publication/326040450>
- (32). Moeuf, A., Lamouri, S., Pellerin, R., Tamayo-Giraldo, S., Tobon-Valencia, E., & Eburdy, R. (2020). Identification of critical success factors, risks and opportunities of Industry 4.0 in SMEs. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1384-1400.
- (33). Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., & Barbaray, R. (2018). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International journal of production research*, 56(3), 1118-1136.
- (34). Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & PRISMA Group*, T. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *Annals of internal medicine*, 151(4), 264-269.

- (35). Müller, J. M., Buliga, O., & Voigt, K. I. (2018). Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. *Technological forecasting and social change*, 132, 2-17.
- (36). Müller, J. M., Kiel, D., & Voigt, K. I. (2018). What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. *Sustainability*, 10(1), 247.
- (37). Müller, J., Dotzauer, V., & Voigt, K. I. (2017). Industry 4.0 and its impact on reshoring decisions of German manufacturing enterprises. *Supply Management Research: Aktuelle Forschungsergebnisse 2017*, 165-179.
- (38). 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.
- (39). Oztemel, E., & Gursev, S. (2020). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of intelligent manufacturing*, 31(1), 127-182.
- (40). Peruzzini, M., Pellicciari, M., Bil, C., Stjepandić, J., & Wognum, N. (2018). Transdisciplinary Engineering Methods for Social Innovation of Industry 4.0. *ADVANCES IN TRANSDISCIPLINARY ENGINEERING*, 1-1224.
- (41). Piccarozzi, M., Aquilani, B., & Gatti, C. (2018). Industry 4.0 in management studies: A systematic literature review. *Sustainability*, 10(10), 3821.
- (42). Preuveneers, D., & Ilie-Zudor, E. (2017). The intelligent industry of the future: A survey on emerging trends, research challenges and opportunities in Industry 4.0. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 9(3), 287-298.
- (43). Puyt, R. W., Lie, F. B., & Wilderom, C. P. (2023). The origins of SWOT analysis. *Long Range Planning*, 56(3), 102304.
- (44). Rajnai, Z., & Kocsis, I. (2017, September). Labor market risks of industry 4.0, digitization, robots and AI. In *2017 IEEE 15th international symposium on intelligent systems and informatics (SISY)* (pp. 000343-000346). IEEE.
- (45). Schlick, J., Lösler, F., Thiel, K., & Reichstein, C. (2014). Industrie 4.0 – das Zukunftprojekt der deutschen Wirtschaft. In *VDI-Berichte* (No. 2217, pp. 271–282). VDI Verlag.
- (46). Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia Cirp*, 52, 161-166.
- (47). Sisinni, E., Saifullah, A., Han, S., Jennehag, U., & Gidlund, M. (2018). Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE transactions on industrial informatics*, 14(11), 4724-4734.
- (48). Soltanali, H., & Ramezani, S. (2023). Smart failure mode and effects analysis (FMEA) for safety–Critical systems in the context of Industry 4.0. In *Advances in Reliability, Failure and Risk Analysis* (pp. 151-176). Singapore: Springer Nature Singapore.
- (49). Soltovski, R., Rodrigues, T. V., Pontes, J., & Resende, L. M. M. (2021). Theoretical framework of the industry 4.0 risks from sustainability perspective. *Revista Competitividade e Sustentabilidade*.
- (50). Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *procedia CIRP*, 40, 536-541.
- (51). Stock, T., Obenaus, M., Kunz, S., & Kohl, H. (2018). Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential. *Process Safety and Environmental Protection*, 118, 254-267.
- (52). Tamvada, J. P., Narula, S., Audretsch, D., Puppala, H., & Kumar, A. (2022). Adopting new technology is a distant dream? The risks of implementing Industry 4.0 in

- emerging economy SMEs. *Technological Forecasting and Social Change*, 185, 122088.
- (53). Triantaphyllou, E., & Triantaphyllou, E. (2000). Multi-criteria decision making methods (pp. 5-21). Springer Us.
- (54). Tupa, J., Simota, J., & Steiner, F. (2017). Aspects of risk management implementation for Industry 4.0. *Procedia manufacturing*, 11, 1223-1230.
- (55). Veza, I., Mladineo, M., & Gjeldum, N. (2015). Managing innovative production network of smart factories. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 555-560.