

Industrie 4.0 dans le secteur manufacturier

Marie Comeau

ÉTAT DE LA QUESTION

QR-1129-fr



NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST (preventionautravail.com)
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2021
ISBN : 978-2-89797-145-8

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec) H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail
Avril 2021

Industrie 4.0 dans le secteur manufacturier

Marie Comeau

IRSST

Collaborateurs :

Élise Ledoux et Denys Denis

Université du Québec à
Montréal (UQAM)
IRSST

ÉTAT DE LA QUESTION

QR-1129-fr



Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document.

En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Cette publication est disponible en version PDF sur le site Web de l'IRSST.



NOTE AU LECTEUR

Les conclusions et recommandations sont celles de l'auteur.
Les résultats des travaux publiés dans ce document n'ont pas fait l'objet d'une évaluation par les pairs.

TABLE DE MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	iii
LISTE DES FIGURES	v
1. INTRODUCTION	1
1.1 Industrie 4.0 au Québec	1
1.2 Développement des connaissances en matière d'industrie 4.0	2
1.2.1 Évènements et formations sur le thème des nouvelles technologies	2
1.2.2 Planification de la recherche.....	2
2. OBJECTIFS	3
3. MÉTHODE	5
3.1 Recherche bibliographique.....	5
3.2 Configuration de la base de données dans NVivo™, analyse de contenu et synthèse	5
4. RÉSULTATS	7
4.1 Description de l'industrie 4.0	7
4.1.1 Révolutions industrielles	7
4.1.2 Naissance de l'industrie 4.0.....	8
4.1.3 Publications sur l'industrie 4.0	8
4.1.4 Nomenclature et définitions de l'Industrie 4.0	8
4.1.5 Concept de l'industrie 4.0	9
4.1.6 Principaux leviers technologiques de l'industrie 4.0	13
4.2 Description des technologies de l'industrie 4.0 sous l'angle de la SST : l'utilité d'une typologie	13
4.3 Transformations du travail et enjeux SST dans l'industrie 4.0	18
4.3.1 Les emplois dans l'industrie 4.0.....	18
4.3.2 Automatisation intelligente et présence accrue du digital dans le secteur manufacturier	21
4.3.3 Cohabitation humain-machine	24
4.4 Avenues de recherche	27
RÉFÉRENCES	29
ANNEXE 1 : MOTS CLÉS ET CRITÈRES DE SÉLECTION DES PUBLICATIONS	33
ANNEXE 2 : DÉFINITIONS DES PRINCIPALES TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE 4.0	35

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Aperçu des mots clés utilisés pour recenser les publications selon l'objectif poursuivi	33
Tableau 2.	Critères d'inclusion et d'exclusion des articles	33
Tableau 3.	Bases de données interrogées.....	34
Tableau 4.	Nombre de documents sélectionnés pour chaque objectif.....	34

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Transition vers la 4 ^e révolution industrielle.....	7
Figure 2.	Schématisation des principaux concepts formant l'industrie 4.0.....	11
Figure 3.	Les leviers technologiques et les nouvelles technologies dans l'industrie 4.0 : la perspective du travailleur.....	16
Figure 4.	Les types de relations entre le travailleur et les technologies de l'I4.0.....	16
Figure 5.	Fonctionnement des technologies dans l'I4.0 : cheminement des données.	17

1. INTRODUCTION

La 4^e révolution industrielle modifiera considérablement le monde du travail. Ces transformations ont déjà débuté et sont plus rapides que lors des dernières révolutions industrielles. L'industrie 4.0 (I4.0), référant à la 4^e révolution industrielle, est actuellement un sujet grandement discuté (Badri, Boudreau-Trudel et Souissi, 2018). Dans cette industrie, plusieurs emplois verront certaines de leurs tâches transformées par les changements technologiques. Ces changements pourraient offrir de nouvelles occasions de réduire des contraintes du travail, mais aussi entraîner de nouveaux risques.

L'épidémie de la COVID-19 ravive les discussions autour de l'automatisation intelligente des industries. Pendant des mesures de distanciation physique, l'industrie 4.0 pourrait participer à la réduction des risques de contamination au travail par la réduction du nombre de salariés requis en présentiel et la possibilité de faire fonctionner les chaînes de production à distance. Pour soutenir ces réflexions, ce rapport de veille produit en 2018 a été mis à jour. Il présente l'industrie 4.0, ses enjeux en santé et sécurité au travail (SST) anticipés¹ et les avenues de recherche potentielles.

1.1 Industrie 4.0 au Québec

En 2017, une enquête du CEFRIO² a documenté l'intérêt des dirigeants d'entreprise du secteur manufacturier québécois à augmenter l'usage des nouvelles technologies issues de la 4^e révolution industrielle (CEFRIO, 2017). Le moteur principal de cet intérêt est l'**amélioration de leurs processus de production ou de gestion**. L'enquête de CATAAlliance et ScienceTech Communications (2017) ajoute que le **manque de main-d'œuvre qualifiée** est aussi un des facteurs qui encouragent les industries à « automatiser » leurs processus. En plus, l'étude du CEFRIO a identifié que **61 % des répondants étaient intéressés à la robotisation, 48 % à l'internet des objets et 43 % à l'infonuagique**. Toutefois, cette enquête souligne que les deux premières barrières à leur implantation sont le **financement insuffisant et le manque d'expertise à l'interne**.

Ces résultats sont en phase avec un des enjeux soulignés par le ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation du Québec (MESI) dans le *Plan d'action en économie numérique du Québec* (MESI, 2016). Ce premier enjeu, sous le thème « recherche et innovation », souligne l'importance du « [...] transfert des résultats de la recherche-développement des universités, collèges et centres de recherche vers les entreprises et les utilisateurs » (MESI, 2016). Le plan vise à informer et soutenir les entreprises dans l'intégration des nouvelles technologies et à accélérer leur transformation numérique. Ses objectifs sont notamment d'encourager l'intégration des technologies de l'information et de la communication (TIC) et d'augmenter « l'intensité numérique » des entreprises du Québec. Afin d'atteindre ses objectifs, le plan prévoit un investissement de 200 millions de dollars sur cinq ans. Par exemple, le plan a permis de financer la création de « l'Audit industrie 4.0 »³ qui est offert aux entreprises du secteur manufacturier.

¹ Documentés dans la littérature grise et scientifique

² CEFRIO : Centre facilitant la recherche et l'innovation dans les organisations, à l'aide des technologies de l'information et de la communication (TIC). Le centre a mis fin à ses activités en juin 2020.

³ [Page web du MESI présentant le service](#)

1.2 Développement des connaissances en matière d'industrie 4.0

1.2.1 Évènements et formations sur le thème des nouvelles technologies

Manifeste de l'intérêt envers l'industrie 4.0, les congrès, colloques et conférences portant sur les nouvelles technologies sont nombreux, et ce partout dans le monde. Par exemple, la Conférence internationale sur la sécurité des systèmes industriels automatisés (SIAS) a consacré son année 2018 à l'usine du futur et aux impacts des nouvelles technologies sur les risques professionnels⁴. L'IRSST a aussi pris part à cet engouement lors de son colloque de 2017. Le thème de l'évènement était « Révolution 4.0 : à l'aube d'une nouvelle SST »⁵. Plus récemment, le XXII^e Congrès mondial sur la sécurité et la santé au travail, prévu en 2020, mais reporté en 2021, sera sous le thème de « La prévention dans le cadre de l'ère de la connectivité »⁶.

Des programmes de formation voient le jour. Par exemple, l'école Polytechnique de Montréal offre un microprogramme en industrie 4.0 dans son département de mathématiques et de génie industriel⁷.

1.2.2 Planification de la recherche

Des instituts de recherche en SST renommés internationalement ont intégré le thème des nouvelles technologies à leur plan stratégique (p. ex. : Eurofound (2016)); Health and Safety Executive (HSE, 2017); Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS, 2018); National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH, 2018); Partenariat pour la recherche européenne en santé et sécurité au travail (PEROSH, 2013); TNO (2017). Le champ de recherche PDSSTET⁸ de l'IRSST s'est joint à la mouvance internationale en incluant la thématique « Révolution numérique (4.0) : opportunités et risques » dans le plan quinquennal 2018-2022 (IRSST, 2018). Le développement de cette thématique a pour objectif de mieux comprendre comment la révolution numérique change le travail et identifier les effets possibles sur les risques en SST. Plus spécifiquement, elle a pour but, par le développement de ces connaissances, de soutenir et d'accompagner les milieux de travail dans l'intégration des nouvelles technologies.

Le champ PRMP⁹ de l'IRSST a développé une programmation thématique portant sur la *cobotique* (« Implantation et utilisation sécuritaire de la robotique collaborative »). Aussi, des réflexions, initiées au sein du champ PRMP, sont menées dans le but de développer une programmation thématique multichamps sur les vêtements intelligents.

⁴ <http://www.inrs-sias2018.fr/>

⁵ <http://www.irsst.qc.ca/colloque-2017>

⁶ <https://www.safety2021canada.com/fr/home-fr/>

⁷ <https://www.polymtl.ca/magi/programmes-detudes/etudes-superieures/microprogrammes/microprogramme-en-industrie-40>

⁸ Prévention durable en SST et environnement de travail

⁹ Prévention des risques mécaniques et physiques

2. OBJECTIFS

Afin d'initier les réflexions dans le cadre de la nouvelle thématique « Révolution numérique (4.0) : opportunités et risques », le présent rapport de veille tentera de répondre à ces objectifs :

- 1) décrire l'I4.0 (secteur manufacturier);
- 2) décrire les technologies de l'I4.0 sous l'angle de la SST (secteur manufacturier);
- 3) documenter les transformations du travail et les enjeux en SST prévus suite à l'introduction de l'I4.0 (secteur manufacturier);
- 4) identifier les avenues de recherche pertinentes pour le champ PDSSTET.

Un portrait de l'I4.0 dans le secteur manufacturier sera obtenu ainsi que les enjeux SST potentiels. Cela pourra faciliter l'identification d'avenues de recherche pertinentes notamment pour le champ PDSSTET.

3. MÉTHODE

La méthodologie utilisée pour répondre aux objectifs (section 2) comprend quatre étapes. D'abord, une recherche bibliographique adaptée aux différents objectifs a été réalisée (section 3.1). Ensuite, la base de données a été construite et une analyse de contenu a suivi (section 3.2). Pour terminer, une synthèse a été réalisée afin de rapporter les résultats propres à chaque objectif (section 3.2).

3.1 Recherche bibliographique

Afin d'obtenir la littérature nécessaire pour répondre aux objectifs, trois recherches bibliographiques distinctes ont été réalisées. Pour répondre au premier objectif, la recherche a ciblé la documentation qui décrivait, catégorisait ou cartographiait l'I4.0. La deuxième recherche bibliographique visait à décrire les technologies de l'I4.0 pertinentes pour le champ PDSSTET et à documenter les enjeux en SST inhérents à la 4^e révolution industrielle, ou I4.0. Ces recherches ont été faites dans plusieurs bases de données sélectionnées par une spécialiste en recherche bibliographique (annexe 1). Elles ont été guidées par des mots clés propres à chaque volet et la documentation devait répondre aux critères préétablis (annexe 1). Des références pertinentes citées dans les articles ont aussi été recueillies.

Finalement, la dernière recherche bibliographique a été effectuée sur les moteurs de recherche d'organisations de recherche en SST. Celle-ci visait à documenter leur planification de recherche et a participé à répondre au dernier objectif, soit d'identifier des avenues de recherche pour le champ PDSSTET. La littérature qui a permis de répondre aux autres objectifs a aussi été utilisée. Le nombre de documents sélectionnés pour chaque objectif est précisé à l'annexe 1.

3.2 Configuration de la base de données dans NVivo™, analyse de contenu et synthèse

La littérature retenue a été classée dans le logiciel NVivo™ pour être analysée. Une grille contenant plusieurs indicateurs a été préconstruite afin de décrire les articles (p. ex. : pays d'origine de l'auteur, année de publication, etc.). Ensuite, les thèmes relatifs à l'I4.0, à ses composantes et aux enjeux SST ont été créés en cours d'analyse. L'information pertinente a été codée et documentée dans la base de données (NVivo™). Finalement, à partir des analyses effectuées, une synthèse de l'information a été faite afin de répondre aux objectifs.

4. RÉSULTATS

4.1 Description de l'industrie 4.0

4.1.1 Révolutions industrielles

Le monde du travail a fait face à plusieurs transformations qui ont été classées en quatre révolutions. Celles-ci sont caractérisées par des changements brusques et radicaux qui transforment les structures économiques et sociales (Rüßmann *et al.*, 2015; Schwab, 2017). Chacune a promis la fin des industries telles qu'elles étaient connues et prévoyait des changements aussi inquiétants que prometteurs.

Les 1^{re} et 2^e révolutions industrielles ont entraîné de grandes transformations dans les entreprises, comme le passage du travail manuel aux processus mécanisés, la création de liens entre les régions géographiquement éloignées et la facilitation des communications grâce au téléphone (Barthélémy et Cette, 2017; Danjou, Rivest et Pellerin, 2017; Lu, 2017; MESI, 2016; Rüßmann *et al.*, 2015).

En 1960, la 3^e révolution industrielle a introduit l'électronique et les technologies de l'information (Danjou *et al.*, 2017; Lu, 2017; Schwab, 2017). La production de masse à moindres coûts était maintenant possible, grâce à l'arrivée d'internet, des ordinateurs, des machines à commandes numériques, des robots, etc. (MESI, 2016; Rüßmann *et al.*, 2015).



TIC : technologies de l'information et des communications; IdO : internet des objets; IA : intelligence artificielle

Figure 1. Transition vers la 4^e révolution industrielle.

Les technologies numériques ont émergé lors de la 3^e révolution industrielle, mais ce qui distingue la 4^e révolution industrielle est la complexité de ces technologies et leur **interconnexion** (figure 1). Cette 3^e vague de transformations est caractérisée par (Daugherty et Wilson, 2018; HSE, 2017; Lu, 2017; Schwab, 2017) :

- les **technologies numériques** qui deviennent **omniprésentes** (p. ex. : l'internet des objets, mégadonnées);
- **l'intelligence artificielle**, moteur des machines autonomes (automatisation intelligente¹⁰), qui promet **l'autonomie** des processus.

¹⁰ Voir l'encadré à la section 4.1.4

Selon Schwab (2017) et le HSE (2017), les transformations sont plus rapides que lors des dernières révolutions et les technologies émergentes font une entrée fulgurante dans tous les milieux. Ces changements modifient notre façon de travailler, de nous informer et de communiquer.

4.1.2 Naissance de l'industrie 4.0

Cette quatrième révolution industrielle a été abordée pour la première fois en 2011 par les Allemands sous le terme « industrie 4.0 » (Badri *et al.*, 2018; Danjou *et al.*, 2017; Lu, 2017; Pellerin, Rivest et Danjou, 2016; Schwab, 2017; Zhong, Xu, Klotz et Newman, 2017). À ce moment, le gouvernement allemand se penchait sur l'avenir du secteur manufacturier dans le but de devenir plus performant et d'y développer l'économie (Lu, 2017).

4.1.3 Publications sur l'industrie 4.0

Cette thématique en émergence est le sujet d'une grande masse de publications provenant de domaines multiples (Badri *et al.*, 2018; Pellerin *et al.*, 2016). Les publications et les articles scientifiques liés à la thématique « industrie 4.0 » sont en forte augmentation depuis 2012-2013¹¹ (Danjou *et al.*, 2017; Liao, Deschamps, Loures et Ramos, 2017). Cette effervescence fait état de l'augmentation de l'intérêt porté à ces nouvelles technologies, mais aussi de l'évolution rapide des connaissances et de l'innovation technologique.

Danjou *et al.* (2017) et Liao *et al.* (2017) ont répertorié géographiquement les publications sous le thème de l'I4.0 et sans grande surprise, l'Allemagne arrive en premier. Danjou *et al.* (2017) précisent que, de 2006 à 2015, les États-Unis et la Chine ont aussi beaucoup contribué aux publications et que le Canada a peu contribué. Liao *et al.* (2017) ont recensé les institutions ayant publié sur ce thème. Selon les résultats, les universités produisent un plus grand volume d'articles (environ le 2/3), avec la collaboration des entreprises et des centres de recherche.

Malgré cette grande quantité de publications, Badri *et al.* (2018) notent que très peu d'articles ont traité des enjeux en SST. Ils n'ont documenté que 11 articles depuis 2012. En plus, ils mentionnent que les articles mettent davantage l'accent sur les nouvelles technologies (et non l'I4.0) et que la SST n'est que sommairement abordée.

4.1.4 Nomenclature et définitions de l'Industrie 4.0

Les termes utilisés pour identifier l'I4.0 sont nombreux (Badri *et al.*, 2018; Danjou *et al.*, 2017; MESI, 2016). Elle peut être nommée « smart factory », « usine intelligente », « smart industry », « factory of the future », « digital factory », etc. (Badri *et al.*, 2018; Danjou *et al.*, 2017; Deloitte, 2015; MESI, 2016).

En plus, le terme « industrie 4.0 » est encore imprécis et confus (Chiarello, Trivelli, Bonaccorsi et Fantoni, 2018; Perales, Valero et García, 2018; Posada *et al.*, 2015). Malgré la masse importante de publications sur le sujet, il ne semble toujours pas avoir de définition unanime de l'I4.0 (Chiarello *et al.*, 2018; Hermann, Pentek et Otto, 2016; Lu, 2017). Perales *et al.* (2018) soulignent que cela pourrait être dû au fait qu'une très grande variété de technologies et de concepts y sont regroupés. Une autre raison évoquée par Chiarello *et al.* (2018) est liée au fait que plusieurs domaines s'y intéressent et que chacun définit l'I4.0 selon leur propre expertise. De manière

¹¹ Non exclusif aux enjeux en SST

générale, les définitions proposées font référence aux entreprises utilisatrices des technologies numériques, et cela au cœur de leurs activités.

Vocabulaire dans l'industrie 4.0

Il n'y a pas que le concept de l'I4.0 qui possède des appellations diverses. Au cœur même de ce concept, les auteurs utilisent plusieurs termes pour parler de la présence des systèmes autonomes (automatisation, digitalisation, logicialisation, numérisation, etc.). L'INRS (2016) confirme que le vocabulaire ne fait toujours pas l'unanimité. Dans le cadre de ce rapport de veille, le terme « automatisation intelligente » sera utilisé afin de différencier la 4^e révolution industrielle (I4.0) de la 3^e (figure 1), soit l'omniprésence du numérique dans le but de rendre les processus autonomes et non seulement d'y intégrer des chaînes de montage (automatisation).

4.1.5 Concept de l'industrie 4.0

Malgré l'absence de définition unanime, il est possible de dresser les principales caractéristiques de l'I4.0.

Premièrement, l'I4.0 se distingue par la présence d'une **connectivité ubiquitaire** (omniprésente). Celle-ci fait référence à la communication en temps réel entre toutes les composantes de l'entreprise grâce à internet et aux nouvelles technologies pour surveiller et agir sur les activités de l'entreprise (Danjou *et al.*, 2017; Pellerin *et al.*, 2016). Ainsi, les éléments physiques (machines, produits, objets, etc.) et les humains (p. ex. : travailleurs et clients) sont interconnectés grâce aux échanges de données numériques (éléments digitaux) (Danjou *et al.*, 2017; Horizons de politiques Canada, 2016a; Li *et al.*, 2017; Lu, 2017; Neugebauer, Hippmann, Leis et Landherr, 2016; Pellerin *et al.*, 2016; Posada *et al.*, 2015; Rüßmann *et al.*, 2015; Thoben, Wiesner et Wuest, 2017; Trappey, Trappey, Govindarajan, Chuang et Sun, 2017; Zhong *et al.*, 2017) (figure 2). Conséquemment, l'entreprise doit gérer une grande quantité d'information qui provient d'endroits variés comme : le plancher de production (donnés de machines, employés, etc.); la chaîne d'approvisionnement (temps de livraison, etc.); chaîne logistique (préparation des commandes, etc.); etc. (Pellerin *et al.*, 2016).

Cet échange d'information est réalisé principalement de deux manières¹² :

- Intégration verticale : communication entre les équipements de production autonomes (p. ex. : robots, cobots, voitures).
- Intégration horizontale : communication entre les services de l'entreprise (entrepôt, production, ventes, etc.), avec d'autres entreprises (p. ex. : des fournisseurs) et les clients.

Ces connexions, ou communications entre les éléments physiques et digitaux créent un système qualifié de « cyberphysique ».

**« CONNECTIVITÉ
UBIQUITAIRE »**
Communication
En **temps réel**
Et **décentralisée**
entre
machines, produits,
systèmes, etc.

La place de l'humain dans les systèmes cyberphysiques

Pour faciliter la compréhension du concept d'I4.0, ses caractéristiques et ses composantes ont été illustrées schématiquement (figure 2). Cette schématisation visait aussi à positionner l'humain dans ce système technologique interconnecté et y noter son impact sur le travail.

La majorité des articles consultés décrivant les systèmes cyberphysiques n'abordent pas la place de l'humain dans ce système. Ceux en faisant mention n'abordent que très sommairement le sujet sans donner d'information pertinente sur le rôle de l'humain. Ainsi, davantage d'articles semblent avoir une approche technocentrée de l'I4.0 et font fi du fait que des travailleurs s'y retrouveront et pourront interagir avec le système. Barcellini (2019) précise que les études se penchent souvent sur la collaboration humain-machine sans considérer les dimensions collectives et organisationnelles du travail. Un paradigme relativement nouveau, les « Cyber-physical-social systems », vise à intégrer l'humain (sa participation et ses interactions – dimension sociale) dans les écosystèmes qui unient le monde digital et physique (Zeng, Yang, Lin, Ning et Ma, 2020). Même si la dimension sociale de ces systèmes est centrale, elle n'a reçu que peu d'attention de la recherche (Zeng *et al.*, 2020).

Selon Barcellini (2019), l'introduction de ces nouvelles technologies dans les entreprises aura comme conséquence de modifier les tâches et les gestes professionnels des opérateurs. De manière générale, la transformation des modes de production entraînera inévitablement des changements au sein des collectifs de travail, dans l'activité de travail et dans l'organisation du travail (répartition des tâches, définition des rôles, changement de procédures, nouvelles compétences à acquérir, etc.). De ce fait, il est important de considérer l'activité de travail réelle des opérateurs et toutes ses dimensions (physique, mentale et sociale) avant l'introduction d'une technologie ou avant la transformation d'un mode de production.

¹² À noter qu'il existe d'autres types d'intégration de l'information, mais que celles-ci sont celles les plus fréquemment évoquées dans la littérature qui a été consultée.

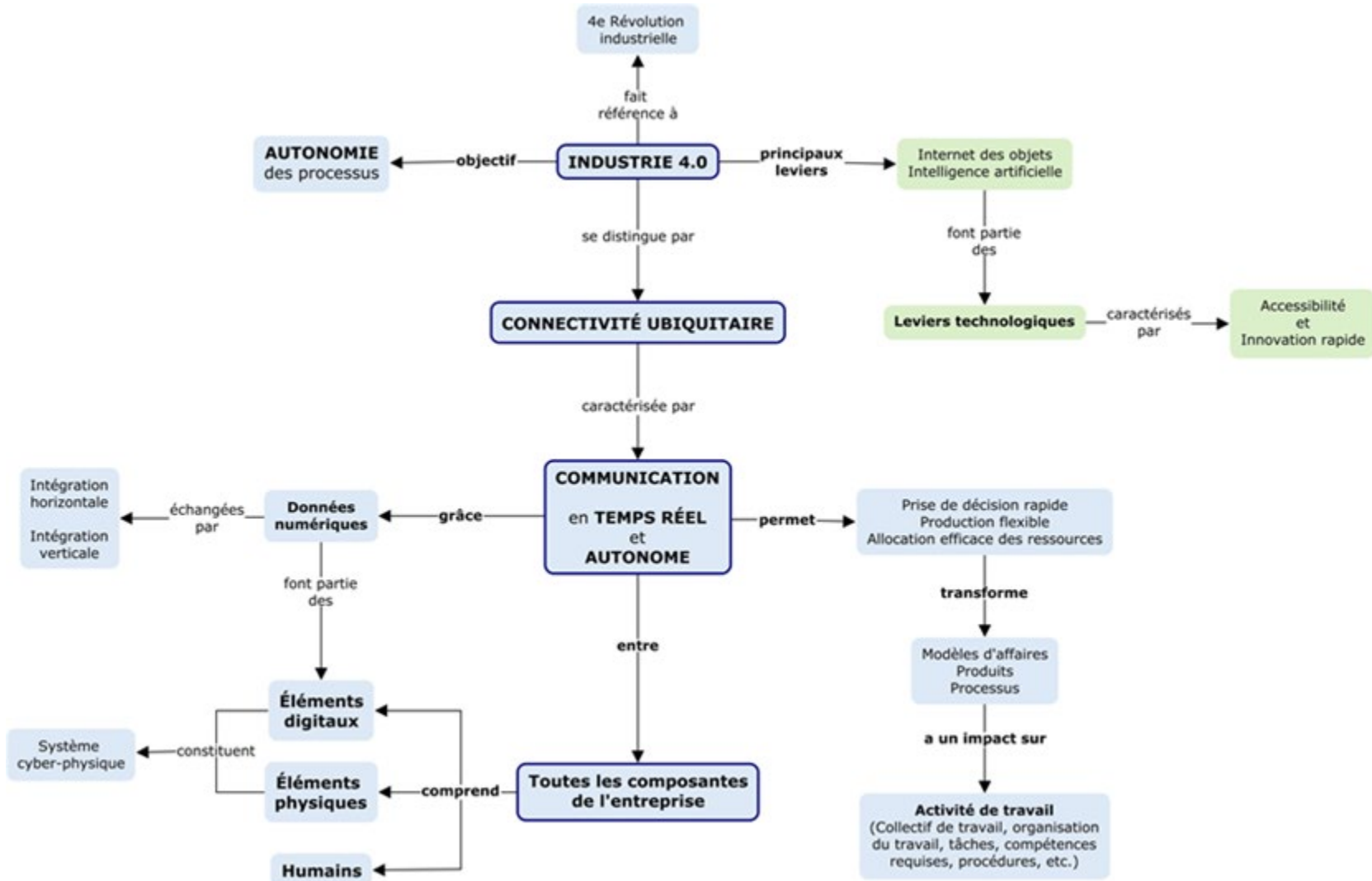


Figure 2. Schématisation des principaux concepts formant l'industrie 4.0.

En plus d'être traités en temps réel, ces échanges d'information (données) sont gérés de manière décentralisée (autonome) (Danjou *et al.*, 2017; Lu, 2017; Perales *et al.*, 2018; Thoben *et al.*, 2017). Cela est possible grâce à plusieurs technologies de pointe, mais les principaux leviers sont l'internet des objets (IdO) et l'intelligence artificielle (IA). Selon la vision de l'I4.0, les entreprises peuvent maintenant surveiller leurs activités, capter les perturbations et identifier les besoins, mais de manière plus efficiente. En effectuant la collecte et le traitement de ces informations en temps réel et de manière autonome, les entreprises visent une **prise de décision rapide**, l'**allocation efficace des ressources** et une **production flexible** (Danjou *et al.*, 2017; Deloitte, 2015; Li *et al.*, 2017; Lu, 2017; Pellerin *et al.*, 2016; Perales *et al.*, 2018; Rüßmann *et al.*, 2015; Schwab, 2017; Thoben *et al.*, 2017; Zhong *et al.*, 2017). Ainsi, l'I4.0 promet une augmentation de la productivité grâce aux processus autonomes qui réduisent au minimum l'intervention de l'humain.

OBJECTIF :

Rendre les processus autonomes

Ce mode de communication autonome entraînera des transformations à plusieurs niveaux. Sans compter les enjeux en SST, les entreprises verront leurs modèles d'affaire, produits et processus se transformer. Dans l'industrie, on observe une tendance marquée vers une offre globale, intégrant les services, plutôt qu'uniquement axée sur la production. De ce fait, l'INRS (2016) note que l'industrie passe à une « économie dite d'usage ou de la fonctionnalité ». Par exemple, la compagnie Michelin a lancé un service visant à faciliter la maintenance préventive de ses pneus¹³. Cela est possible grâce aux produits connectés qui transmettent de l'information à la compagnie. Celle-ci analyse les données et envoie l'information pertinente au client (pression des pneus, usure, etc.).

À noter : l'I4.0 ne touche pas seulement le secteur manufacturier, mais bien une **vaste étendue de secteurs** (Danjou *et al.*, 2017; Pellerin *et al.*, 2016).

Par exemple : commerce de détail; transport et distribution; bioalimentaire; construction; services financiers; éducation; énergie; culture; santé

Aussi, le secteur des services tend de plus en plus vers l'adoption des modèles d'affaire des industries (INRS, 2016). Par exemple, depuis quelques années on note une taylorisation des activités de services où tout devient standardisé pour améliorer la productivité (réduire les délais et les coûts)¹⁴. De plus, certains services s'automatisent. On peut penser aux services bancaires en ligne, aux boutiques en ligne et aux soutiens techniques autonomes (p. ex. : clavardage ou discussion téléphonique avec une entité artificielle fonctionnant grâce à l'IA).

Ainsi l'écart entre le secteur manufacturier et celui des services tend à se réduire. Selon l'INRS (2016), nous pourrions ainsi dire que « l'industrie tend à se *servicaliser* » et qu'inversement, « les services tendent à s'industrialiser »¹⁵. Or, l'innovation rapide des nouvelles technologies et leur accessibilité croissante risquent d'accélérer l'arrivée de ces transformations (Deloitte, 2015; HSE, 2017; Schwab, 2017).

¹³ <https://www.usine-digitale.fr/editorial/michelin-lance-une-gamme-de-services-autour-du-pneu-connecte.N355307>

¹⁴ Pour un exemple de Taylorisation du secteur des services : reportage de Cash investigation – caissière de supermarché (43 :00) <https://www.dailymotion.com/video/x62d2cl>

¹⁵ Le présent état de la question ne concerne pas le secteur des services. Toutefois, il serait intéressant de consacrer un prochain état de la question à la digitalisation dans les services.

Finalement, une entreprise ne deviendra pas une I4.0 du jour au lendemain et ce ne sont pas toutes les entreprises qui gagnent à rendre leurs processus complètement autonomes (Danjou *et al.*, 2017). La transition vers l'I4.0 peut être progressive, notamment grâce aux différentes technologies (leviers technologiques) qui permettent son intégration graduelle.

Dans ces classifications, l'I4.0 se retrouve davantage aux derniers niveaux où les processus, ou une partie de ceux-ci sont autonomes.

4.1.6 Principaux leviers technologiques de l'industrie 4.0

Outre les deux principaux moteurs de l'I4.0, soit l'IA et l'IdO, la communication en temps réel et décentralisée est aussi possible grâce aux nombreuses technologies disruptives. Celles-ci font leur entrée en masse en entreprise, car elles sont de plus en plus accessibles, notamment financièrement (Pellerin *et al.*, 2016; Schwab, 2017). Par exemple, le coût d'un robot diminue chaque année : « le prix moyen est actuellement d'environ 60 000 \$ l'unité, ce qui avec les frais d'installations, de logiciel et d'ingénierie revient à près de 200 000 \$ » (CATAAlliance et ScienceTech Communications, 2017). En plus, ces leviers technologiques font l'objet d'innovations florissantes (Deloitte, 2015; HSE, 2017; Schwab, 2017). Par exemple, les capteurs sont de plus en plus petits et de plus en plus performants.

Voici les principaux leviers technologiques recensés :

- Intelligence artificielle
- Internet des objets
- Systèmes cyberphysiques
- Infonuagique
- Mégadonnées
- Capteurs et actionneurs
- Réalité augmentée
- Réalité virtuelle
- Robotique de pointe

Pour une description de ces leviers technologiques, le lecteur peut consulter l'annexe 2.

4.2 Description des technologies de l'industrie 4.0 sous l'angle de la SST : l'utilité d'une typologie

Considérant le grand nombre de « nouvelles technologies » et leur évolution constante, il est difficile, voire quasi impossible, de toutes les identifier et de cibler celles ayant un intérêt en SST. Cette liste serait en constante évolution. Toutefois, les technologies de l'I4.0 seront inévitablement introduites dans les milieux de travail et modifieront l'activité de travail. Il a été jugé pertinent d'amorcer une réflexion sur une typologie des technologies de l'I4.0. Une typologie peut autant avoir un rôle descriptif, interprétatif, que prédictif (Basque et Lundgren-Cayrol, 2002). Cette typologie offrirait un cadre commun pour aborder la thématique. Elle permettrait de résumer les connaissances et réduire la complexité de la thématique (Basque et Lundgren-Cayrol, 2002). L'identification des caractéristiques des technologies serait facilitée pour éventuellement aider à la description et la compréhension de leur rôle dans l'activité de travail.

Dans l'I4.0, le travailleur aura toujours sa place et restera essentiel au bon fonctionnement des opérations (Daugherty et Wilson, 2018). Pour se rapprocher de la mission de l'IRSST qui a pour objectif l'identification des risques et l'« élimination à la source même des dangers pour la santé,

la sécurité et l'intégrité physique des travailleurs »¹⁶, une réflexion a débuté sur la place du travailleur dans l'I4.0 où celui-ci est placé au cœur de l'I4.0 et adopte sa perspective pour approcher le concept. Plus précisément, l'objectif était d'observer les nouvelles technologies comme déterminants¹⁷ de l'activité de travail¹⁸. Cette approche permet d'observer les technologies qui risquent d'impacter l'activité de travail et en conséquence, le travailleur lui-même.

Voici une proposition préliminaire de ce que pourrait comprendre une **typologie des technologies de l'I4.0 en SST** qui place le travailleur au cœur de cette industrie¹⁹ :

A. Objectif(s) de l'introduction de la technologie

Chaumon Bobillier (2017) propose une typologie des TIC où il inclut leurs principaux objectifs et bénéfiques. Ces caractéristiques seraient applicables aux technologies de l'I4.0 et aideraient à comprendre leur action.

- I. Communication : pour transmettre et échanger de l'information
- II. Collaboration : optimiser et coordonner le travail en équipe virtuelle (mettre les personnes en réseau)
- III. Gestion : « formaliser et automatiser le recueil, le traitement et l'accès aux données stratégiques de l'entreprise » pour augmenter la performance organisationnelle (optimiser les processus, imposer des procédures, etc.)
- IV. Aide à l'action : support des activités humaines lors des tâches exigeantes physiquement
- V. Aide à la décision : support des activités humaines lors des tâches cognitives (diagnostic, résolution de problème, etc.)
- VI. Formation : accompagnement des apprentissages

B. Rôle de la technologie

La typologie de Chaumon Bobillier (2017) inclut aussi le rôle ou l'apport des technologies. Voici deux sous-catégories qui en ont été inspirées :

- I. Capacitante : améliore ou augmente les capacités physiques, cognitives ou sociales de l'humain
- II. Substitutive : remplace l'humain dans l'exécution d'une tâche ou d'un emploi

C. Propriétés organisationnelles de la technologie

Chaumon Bobillier (2017) inclut aussi l'aspect organisationnel de la relation entre le travailleur et la technologie. Voici les sous-catégories proposées :

- I. Prescriptives : vise à faire appliquer des procédures strictes

¹⁶ Loi sur la santé et la sécurité du travail

¹⁷ Déterminant : « élément de la situation de travail qui est à l'origine de la façon dont la personne pourra réaliser son activité » (St-Vincent *et al.*, 2011). Il y a trois grandes catégories de déterminants, soit la tâche, les conditions et moyens offerts par le milieu de travail et l'environnement social.

¹⁸ Selon le Modèle de la situation de travail centré sur la personne en activité (Vézina, 2001)

¹⁹ Cette typologie préliminaire et sa pertinence ont été guidées par la documentation obtenue pour répondre au 3^e objectif, soit d'identifier les enjeux SST prévus avec l'introduction de l'I4.0 (section 4.3).

- II. Discrétionnaires : propose des repères/guide ou un « cadre d'action possible » et le travailleur peut choisir de l'appliquer ou non
- III. Flexibles : offre « des ressources et des moyens quasi illimités à l'individu pour imaginer et réaliser toute l'étendue de ses projets » (p. ex. : imprimante 3D)

D. Type de technologie

Le type de nouvelle technologie se décline en deux sous-catégories²⁰ (figure 3) :

- I. Leviers technologiques : technologies qui agissent comme moteur de changement et transforment les technologies avec lesquelles le travailleur a des interactions. Elles permettent aussi les avancées de l'I4.0. Ces leviers peuvent se retrouver dans plusieurs nouvelles technologies. Sauf exception (p. ex. : concepteurs des technologies), le travailleur n'aura pas à travailler directement avec celles-ci.
- II. Nouvelles technologies : technologies avec lesquelles le travailleur pourrait avoir des interactions concrètes dans le cadre de son activité de travail (surtout des accessoires et des machines qualifiés d'intelligents, comme des lunettes utilisant la réalité virtuelle ou augmentée).

²⁰ Ces propositions de l'auteurice du présent rapport sont basées sur les types de technologies identifiées dans la littérature consultée.

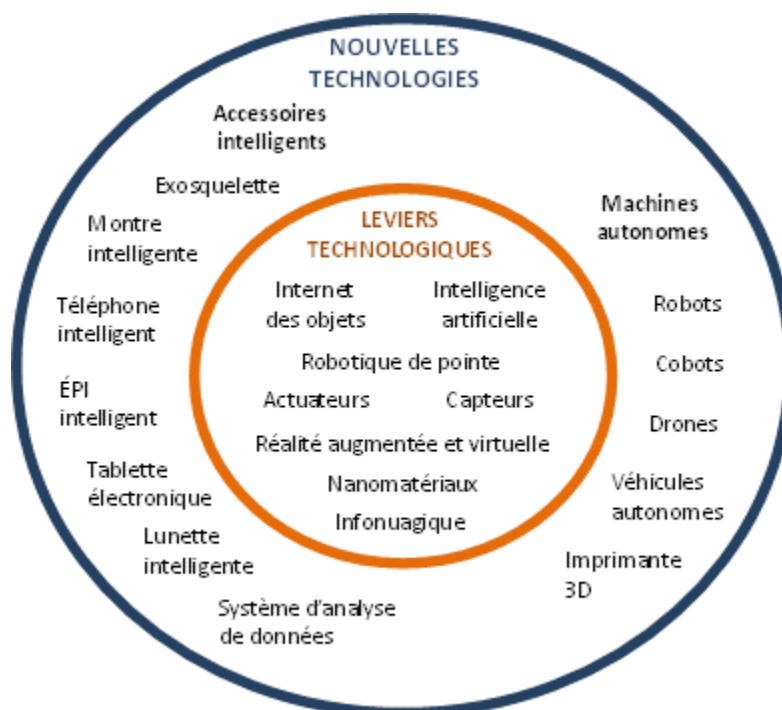


Figure 3. Les leviers technologiques et les nouvelles technologies dans l'industrie 4.0 : la perspective du travailleur.

E. Type de relation avec le travailleur

Les technologies pourraient également être caractérisées selon le type d'interactions entre elles et le(s) travailleur(s). Cette catégorie pourrait se décliner en quatre sous-catégories²¹ (figure 4) :

- I. Cohabiter : le travailleur occupe le même espace que la technologie, mais leurs activités n'ont pas de relation directe ou indirecte.
- II. Interagir : le travailleur a à interagir avec la technologie dans le cadre de ses tâches. Son activité pourrait être impactée par celle de la technologie. Par exemple, une machine autonome pourrait assembler certaines pièces sur lesquelles le travailleur doit travailler.
- III. Utiliser : le travailleur a besoin de la technologie et l'utilise pour réaliser une tâche ou son activité de travail.
- IV. Vêtir : le travailleur porte sur lui la technologie dans le cadre de son activité de travail (p. ex. : montre intelligente)

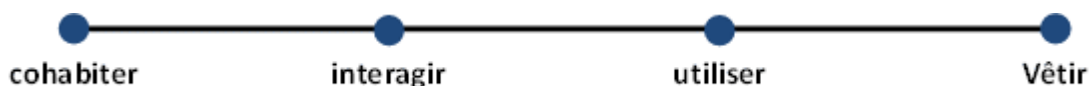


Figure 4. Les types de relations entre le travailleur et les technologies de l'I4.0.

²¹ Ces propositions de l'auteurice du présent rapport sont basées sur les types de technologies identifiées dans la littérature consultée et les types de relations anticipées entre celles-ci et les travailleurs.

F. Fonctionnement de la technologie – cheminement des données

Comme les données numériques, leur collecte, traitement et utilisation sont au cœur de l'I4.0, une catégorie pourrait concerner spécifiquement cet aspect. Voici les sous-catégories proposées²² (figure 5) :

- I. Collecte d'information (input) :
 - Via les méthodes traditionnelles : les données sont collectées par des systèmes informatiques simples ne mettant pas en relation le système physique et virtuel et ayant des capacités de stockage limitées. Ici la technologie ne ferait pas partie de l'I4.0.
 - Via l'IdO/infonuagique/internet : une masse importante de données sont collectées et emmagasinées (p. ex. : grâce à l'infonuagique). Le système est en mesure de relier les éléments physiques et virtuels (p. ex. : grâce à l'IdO).
- II. Analyse de l'information :
 - Manuelle : un humain doit traiter l'information
 - Autonome : l'information, souvent en grande quantité, est traitée sans l'intervention de l'humain
- III. Réponse (Output) :
 - Directe : l'information, une fois analysée, est envoyée sans délai au travailleur et peut être sous forme visuelle, auditive, kinesthésique, etc.
 - Indirecte : l'information, une fois analysée, n'est pas envoyée au travailleur en temps réel. Celui-ci peut recevoir l'information de manière différée (p. ex. : le nombre de boîtes manutentionnées dans une journée de travail est annoncé au travailleur à la fin de sa journée) ou invisible (l'information n'est jamais transmise au travailleur. Par exemple, un système pourrait capter que la production a pris du retard et augmenter la vitesse de la chaîne de production sans aviser les travailleurs).

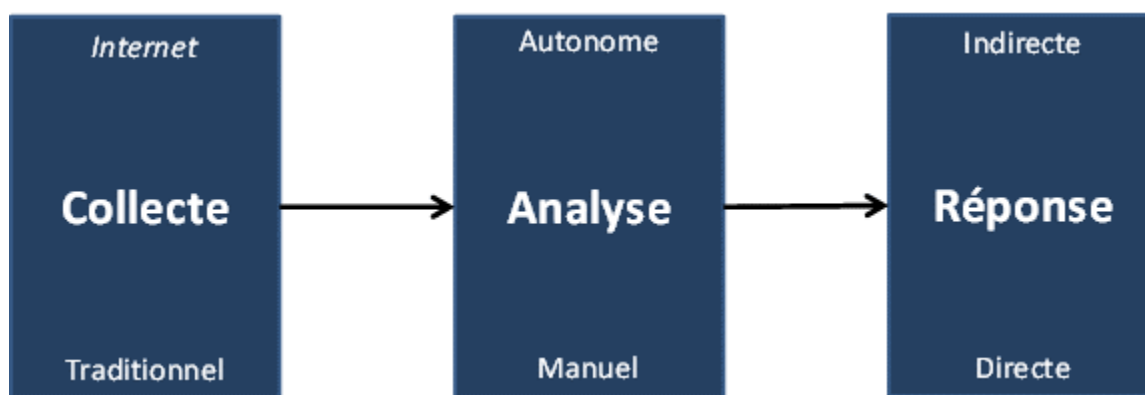


Figure 5. Fonctionnement des technologies dans l'I4.0 : cheminement des données.

²² L'auteur du présent rapport a émis ces propositions en se guidant des technologies identifiées dans la littérature consultée et les types d'utilisations et de fonctionnements de celles-ci.

Il est primordial de toujours situer l'analyse des caractéristiques de la technologie dans le contexte de son utilisation. Ainsi, cette typologie préliminaire considère le travailleur et sa situation de travail, soit le **contexte d'utilisation de la technologie**. Cela est indissociable d'une compréhension de l'impact des technologies de l'I4.0 sur la SST. Cette approche pourrait faciliter la compréhension des risques en SST liés aux technologies et aider à leur intégration en entreprise.

Finalement, d'autres types de classements existent. Par exemple, Romero *et al.* (2016) classent, entre autres, les technologies et leurs relations avec le travailleur selon leur sollicitation physique et/ou cognitive. Pour sa part, le CEFRIO (2017) classe les nouvelles technologies selon leur principal levier technologique.

4.3 Transformations du travail et enjeux SST dans l'industrie 4.0

Les impacts de certaines technologies sur la SST ont déjà été documentés. Il s'agit principalement des enjeux de sécurité au travail. Par exemple, les robots et robots collaboratifs ont déjà fait l'objet d'études. Toutefois, comme mentionné par Badri *et al.* (2018), peu d'études ont été menées sur l'I4.0 et la SST. Ainsi, il y a encore beaucoup d'incertitude quant à la manière dont les nouvelles technologies de l'I4.0 vont transformer le travail et quant aux impacts sur la santé des travailleurs. En plus, ces nombreuses technologies présentent chacune des enjeux qui leur sont propres (Fernández-Macías *et al.*, 2018). Conséquemment, l'I4.0 et principalement son impact sur la santé des travailleurs fait encore surtout l'objet de regards prospectifs.

Il a été possible de documenter les enjeux en SST anticipés avec l'arrivée de l'I4.0. Celle-ci risque d'avoir des impacts à plusieurs niveaux et entraîner des conséquences positives comme négatives sur la santé physique et psychologique des travailleurs (Fernández-Macías, 2018; Stacey *et al.* 2017). Ces informations documentées dans les prochaines sections pourront être utiles afin d'identifier des sujets de recherche pertinents.

4.3.1 Les emplois dans l'industrie 4.0

4.3.1.1 Gains, pertes ou transformation des emplois?

Au début du 20^e siècle, John Maynard Keynes craignait un « chômage technologique » (Organisation de coopération et de développement économiques [OCDE], 2016; Schwab, 2017). Aujourd'hui encore, cette crainte perdure. Ces technologies ont jusqu'à maintenant agi comme support à l'humain. C'est l'arrivée de l'IA qui chamboule tout, car elle pourrait possiblement permettre de remplacer l'humain. Face à cette situation, deux visions existent, soit le regard optimiste et pessimiste (Schwab, 2017).

À titre d'exemple, Frey et Osborne (2013), ayant une vision pessimiste, ont évalué que 70 % des emplois aux États-Unis font face à une possibilité d'automatisation et qu'à moyen terme 47 % des emplois pourraient être substitués.

L'OCDE (2016) a une vision moins alarmiste. Elle prévoit que seulement certaines tâches pourront être automatisées et qu'une automatisation complète d'un emploi ou d'un métier est beaucoup moins probable que ce que prévoient Frey et Osborne (2013). Une étude de Statistique Canada (2020) a estimé que 10,9 % des travailleurs canadiens présentent un risque élevé de voir leur emploi transformé dû à l'automatisation et 29,1 % présentent un risque modéré. Toutefois, les emplois à faible risque d'automatisation peuvent comporter une part importante de

tâches automatisables. Ainsi ces emplois ne disparaîtraient pas, mais se transformeraient. En plus, de nouvelles opportunités d'emplois pourraient émerger.

Il est difficile de prédire les transformations dans les emplois, car plusieurs facteurs peuvent intervenir, comme des enjeux politiques, économiques, d'acceptabilité de la perte de contact avec l'humain, etc. En général, on projette que les tâches manuelles et cognitives routinières seront davantage rendues autonomes. Les emplois moins vulnérables sont ceux demandant des compétences cognitives plus poussées ou des emplois très peu routiniers. Ils comprennent des tâches que l'on peut plus difficilement rendre autonomes. Toutefois, avec l'IA, certains croient que cette limite pourrait tomber.

Schwab (2017) et l'OCDE (2016) notent également que le marché du travail tend davantage à se polariser. Cette tendance s'observe depuis déjà plusieurs années, mais nous pourrions voir de plus en plus des :

- emplois intellectuels, demandant plus de créativité et bénéficiant d'une bonne rémunération;
- emplois manuels faiblement rémunérés avec peu de possibilités d'avancement.

Pour ce qui est de la SST, il importe de suivre et d'anticiper les transformations du bassin d'emploi et de considérer les enjeux SST qui pourraient évoluer simultanément.

4.3.1.2 Compétences requises dans l'industrie 4.0

Selon la littérature consultée, l'I4.0 aura besoin d'une main-d'œuvre multidisciplinaire et de travailleurs davantage scolarisés ou ayant des compétences techniques propres à l'emploi (Fernández-Macías, 2018; HSE, 2017; Horizons de politiques Canada, 2016b; Schwab, 2017). Par exemple, Horizons de politiques Canada (2016b) prévoit que les besoins seront principalement en :

- Science
- Technologies
- Ingénierie
- Mathématiques
- Entrepreneuriat
- Conception
- Communication

Pour concurrencer l'IA, en plus des compétences énumérées ci-dessus, l'humain pourra miser sur sa créativité et ses compétences interpersonnelles (Horizons de politiques Canada, 2016b). Cela sera vrai pour les postes à salaires plus élevés. Pour les postes à salaire moindres, le développement des compétences en lien avec la collaboration humain-machine sera à prioriser (Horizons de politiques Canada, 2016b).

Au niveau de la SST, comme pour les emplois, le changement dans les compétences requises pourrait être accompagné d'un changement du portrait léSIONNEL. De plus, si l'entreprise ne réussit pas à se munir d'employés suffisamment qualifiés cela pourrait avoir une répercussion négative sur la SST (Stacey *et al.*, 2017). Les entreprises devront s'assurer de supporter suffisamment les travailleurs pour que ceux-ci acquièrent les compétences requises et veiller à ce qu'ils aient les opportunités pour les maintenir à jour (voir la section 4.4.1.3).

4.3.1.3 Formation à l'ère du 4.0

Avec l'évolution rapide des technologies, les compétences des travailleurs peuvent devenir rapidement désuètes (Horton, Cameron, Devaraj, Hanson et Hajkowicz, 2018; Stacey *et al.*, 2017). Face à ces innovations rapides, les entreprises devront former régulièrement leurs employés (Fernández-Macías *et al.*, 2018; HSE, 2017; Stacey *et al.*, 2017). Ainsi, la formation en milieu de travail, et précisément au poste de travail, sous la forme de transfert d'expertise entre les employés, sera importante pour rester à jour (Fernández-Macías *et al.*, 2018; HSE, 2017; Romero *et al.*, 2016).

« Large companies such as General Electric are increasingly making IT skills training, including basic coding, mandatory for all new employees 'from top floor to work floor' ». (Fernández-Macías et al., 2018)

Cette demande fréquente de mise à niveau des compétences en lien avec l'introduction ou l'évolution d'une technologie pourrait augmenter la charge cognitive et avoir un impact négatif sur la santé psychologique des travailleurs (Horton *et al.*, 2018). De plus, l'information provenant des différents objets connectés pourrait exacerber cette surcharge cognitive par la trop grande quantité d'information envoyée au travailleur.

Horizons de politiques Canada (2016b) rapporte que les tendances de formation actuelles, comme les plateformes d'apprentissage en ligne via des vidéos et des applications, pourraient être remplacées par ce qu'ils appellent un « écosystème d'apprentissage global ». Dans ce système, il sera possible d'utiliser les environnements intelligents dans le cadre des apprentissages. Ainsi, les objets connectés peuvent devenir des occasions d'apprentissage en partageant de l'information aux travailleurs (Horizons de politiques Canada, 2016b; Stacey *et al.*, 2017). Par exemple, avec les mégadonnées, l'IA dans les entreprises pourrait offrir des formations de plus en plus personnalisées qui pourraient :

- « prévoir le comportement d'apprentissage d'un individu
- créer des parcours d'apprentissage
- déterminer le niveau des connaissances
- faire office de conseiller d'orientation automatisé » (Horizons de politiques Canada, 2016b).

En captant des données, ces systèmes pourraient évaluer les progrès d'apprentissage des travailleurs. En plus, la réalité virtuelle et augmentée sont aussi des opportunités intéressantes de formation immersives.

Les nouvelles technologies, comme les accessoires intelligents, pourraient faciliter la communication efficace d'information sur la prévention en SST (Stacey *et al.*, 2017). En plus, elles pourront aussi faciliter les échanges en brisant les barrières géographiques, linguistiques et culturelles (Horizons de politiques Canada, 2016b).

Finalement, les technologies de l'I4.0 pourraient aussi soutenir les travailleurs pendant la réalisation de procédures ou de tâches en temps réel (Horton *et al.*, 2018). Par exemple, des compagnies offrent des lunettes intelligentes capables de donner de l'information aux travailleurs quant aux procédures à suivre. En plus, celles-ci peuvent connecter le travailleur à du soutien technique à distance et accompagner le travailleur dans la réalisation de sa tâche.

4.3.1.4 Travailleurs seniors 4.0

Les nouvelles technologies pourraient aider les travailleurs vieillissants à rester plus longtemps au travail ou à y retourner (Romero *et al.*, 2016). Par exemple, un exosquelette connecté pourrait réduire la charge physique des travailleurs vulnérables lors de l'exécution de tâches à forte charge physique (Horton *et al.*, 2018). De plus, la possibilité de travailler à distance, même dans le secteur manufacturier, pourrait être un facteur du maintien au travail des travailleurs seniors en facilitant la conciliation entre le travail et la vie personnelle. Toutefois, Badri *et al.* (2018) croient que la maîtrise des nouvelles technologies pourrait être difficile pour une population vieillissante. Par contre, celle-ci utilise déjà plusieurs TIC au travail ou dans leur vie quotidienne. Il serait peut-être plus juste de parler de mise à niveau des compétences.

4.3.2 Automatisation intelligente et présence accrue du digital dans le secteur manufacturier

4.3.2.1 Flexibilité de la production et connexion en continu

Afin de répondre aux objectifs de l'I4.0, comme la production flexible et la prise de décision rapide (p. ex. : en cas de défaillance d'une machine autonome), les travailleurs pourraient avoir à rester connectés en continu à l'aide d'appareils électroniques mobiles. Ces appareils pourraient leur permettre de contrôler la chaîne de production à distance et de pouvoir communiquer en tout temps avec leurs collègues. Deux enjeux sont anticipés (Stacey *et al.*, 2017) :

- Intensification du travail (charge de travail) et nombre excessif d'heures travaillées : pourraient avoir un impact négatif sur la santé mentale des travailleurs
- Utilisation d'appareils électroniques mobiles et posture adoptée lors de leur utilisation : risque de développer des TMS

À l'international, cette connexion en permanence a déclenché plusieurs débats. Par exemple, en France, la Loi Travail a été bonifiée du « droit à la déconnexion » le 1^{er} janvier 2017²³. Son objectif est d'assurer aux employés leur droit au temps de repos et au congé. Par exemple, la loi permet aux employés de ne pas répondre à des courriels ou appels à l'extérieur de leur temps de travail (Désaunay, 2017).

Pour ce qui est des opportunités, certains soulignent la possibilité d'une meilleure conciliation entre la vie professionnelle et personnelle grâce à la possibilité de travailler à distance. De plus, la possibilité de communiquer facilement avec les collègues, de manière virtuelle, est accueillie positivement par certains.

L'essor de l'IA et la présence accrue du digital permettent aussi de nouvelles formes d'emploi où le travail à distance prévaut. Une tendance à surveiller est les « flashes organisations » dans lesquelles des équipes de travail éphémères et délocalisées sont créées le temps de réaliser un projet (Héry et Malenfer, 2018).

4.3.2.2 La cybersécurité

L'automatisation intelligente des processus grâce aux éléments digitaux, dont l'IdO, rend les organisations plus vulnérables aux attaques informatiques (Badri *et al.*, 2018; HSE, 2017; Stacey *et al.*, 2017). Selon Steijn, van der Vorm, Luijff, Gallis et van der Beek (2016), la cybersécurité pourrait avoir un impact direct sur la SST. Par exemple, dans une entreprise où les travailleurs cohabitent avec des machines autonomes, une entité externe pourrait prendre contrôle des véhicules autonomes, des exosquelettes connectés ou des cobots (INRS, 2016). Ainsi, une cyberattaque pourrait causer des comportements imprévisibles de la part des machines autonomes et causer des accidents graves (Steijn *et al.*, 2016).

Outre les accidents causés par la prise de contrôle de machines, une brèche dans la confidentialité des données récoltées grâce au monitoring des travailleurs pourrait aussi avoir un impact sur ceux-ci (Stacey *et al.*, 2017).

Fernández-Macías *et al.* (2018) mettent l'accent sur l'importance du recrutement d'employés qualifiés en cybersécurité et de la formation des employés pour assurer une sécurité adéquate. En plus, l'évolution constante des technologiques rend les outils de cybersécurité désuets rapidement ce qui nécessite de se mettre fréquemment à jour (Steijn *et al.*, 2016). Ainsi, les responsables SST et les travailleurs devront développer cette nouvelle compétence.

²³https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexteArticle.do;jsessionid=B586440ACBE8F266F012720C43421185.tpdila08v_1?idArticle=JORFARTI000032984268&cidTexte=JORFTEXT000032983213&dateTexte=29990101&categorieLien=id

4.3.2.3 Prévention en SST ou surveillance?

La présence accrue du digital dans l'I4.0 présente des opportunités en termes de prévention en SST. La comptabilisation de l'exposition aux risques permettrait d'assurer un meilleur contrôle et suivi (Stacey *et al.*, 2017). Par exemple, il serait possible de monitorer l'exposition individuelle aux substances toxiques via des capteurs dans des vêtements intelligents. Cela est déjà présent depuis quelque temps dans certains secteurs, comme pour mesurer l'exposition aux radiations nucléaires dans des centrales. L'apport de l'I4.0 serait l'utilisation de ces données et leur analyse effectuée de manière autonome pour agir en prévention²⁴. Ainsi, les données collectées pourraient faciliter l'analyse des accidents et des incidents pour ensuite en identifier la cause et agir en prévention (HSE, 2017; Horton *et al.*, 2018; Polak-Sopinska, Wisniewski, Walaszczyk, Maczewska et Sopinski, 2020). Les interventions réalisées pourraient aussi être comptabilisées et analysées pour en évaluer l'efficacité dans un objectif d'amélioration continue de la prévention (Stacey *et al.*, 2017). Ce type d'approche est certes très prometteuse. Toutefois, les auteurs ne détaillent pas comment réaliser ces analyses.

Exemples de données pouvant être récoltées :

Rythme de travail; rythme de complétion d'une tâche; présence et absence au travail; fréquences cardiaques; pression artérielle; etc.
(Fernández-Macías *et al.*, 2018)

La flexibilité de la production dans l'I4.0 pourrait rendre plus difficile la prévention en SST, car les risques pourraient évoluer selon les changements dans la production. Cela pourrait obliger les entreprises à effectuer des analyses de risques plus « dynamiques » ou en temps réel (Badri *et al.*, 2018; Stacey *et al.*, 2017).

Un autre enjeu important est lié au monitoring des travailleurs et aux données qui pourront être récoltées grâce à plusieurs technologies. Ce genre de monitoring a déjà débuté. Nous pouvons penser aux systèmes GPS installés dans les camions de livraison qui documentent le déplacement des véhicules ou encore, aux données récoltées avec les appareils à commandes vocales (voir encadré à la fin de la section 4.3). Cet enjeu grandissant sera d'ailleurs une question importante pour les syndicats qui devront discuter avec leur employeur de la mise en œuvre de ce monitoring (Degryse, 2017; Fernández-Macías *et al.*, 2018). Ce monitoring, pouvant être dans un objectif de prévention en SST, pourrait aussi servir à documenter la performance des employés (Fernández-Macías *et al.*, 2018; Horton *et al.*, 2018; Stacey *et al.*, 2017). Cela peut présenter plusieurs enjeux :

- confidentialité et discrimination (Fernández-Macías *et al.*, 2018; Stacey *et al.*, 2017);
- encourager l'intensification du travail (Horton *et al.*, 2018; Stacey *et al.*, 2017);
- contrôle permanent : peut réduire l'autonomie, la marge de manœuvre et intensifier le travail (INRS, 2016).

Il faut aussi souligner que la masse importante de données récoltées représente un défi. Il faudra d'abord identifier quelles données sont réellement utiles afin d'agir dans une optique de prévention en SST. Toutefois, il serait important de ne pas tout miser sur les données quantitatives et laisser de côté le qualitatif. Celui-ci est riche en information et peut mettre au jour

²⁴ Pour plus d'information sur les vêtements intelligents :

Dolez, P., Decaens, J., Buns, T., Lachapelle, D., Vermeersch, O. et Mlynarek, J. (2018). *Analyse du potentiel d'application des textiles intelligents en santé et en sécurité au travail* (Rapport n° R-1029). Montréal, QC : IRSSST.

des éléments que le quantitatif ne pourrait déceler. Cela pourrait aussi pallier le risque de faille dans les données numériques. Finalement, en absence de législation, l'utilisation de ces données reposera sur la bonne volonté des employeurs²⁵.

4.3.3 Cohabitation humain-machine

Badri *et al.* (2018) soulignent que la collaboration entre humains et machines est au cœur de l'I4.0 et qu'il s'agit d'un enjeu important à considérer en SST. Certains de ces risques sont davantage documentés, comme les risques liés à la sécurité au travail. Par exemple, des risques de collision avec un robot ou un cobot devront encore être considérés (INRS, 2016). À cet effet, les travailleurs de l'I4.0 pourraient, par exemple, être munis de capteurs afin de réduire ces risques.

4.3.3.1 Déshumanisation du travail

Le travailleur, au cœur d'une usine où la production est principalement effectuée par les machines autonomes, pourrait se sentir rapidement isolé. Dans ce contexte, les relations humaines sont remplacées par les relations virtuelles (Horton *et al.*, 2018; Stacey *et al.*, 2017). Cela peut entraîner une destruction du sens du travail causé par la disparition des collectifs.

« Si le travailleur est cantonné pour l'essentiel à une tâche de surveillance des équipements, cette perte de sens peut être encore plus grande. » (INRS, 2016)

De plus, si ces collectifs se dissolvent, les possibilités de soutien entre travailleurs seront réduites, tout comme la défense des intérêts du collectif (INRS, 2016). Cette déshumanisation du travail pourrait avoir des effets négatifs sur la santé psychologique des travailleurs (Horton *et al.*, 2018). Il est aussi important de noter que l'impact de l'automatisation intelligente sur la santé psychologique est peu connu (Horton *et al.*, 2018). Toutefois, Badri *et al.* (2018) soulignent que les machines autonomes pourraient être en mesure de faciliter ces interactions en interprétant les émotions humaines.

4.3.3.2 Répartition des tâches

L'automatisation intelligente peut avoir des effets positifs ou négatifs en lien avec l'attribution de certaines tâches aux machines autonomes (Stacey *et al.*, 2017). Selon Horizons de politiques Canada (2016b), les tâches répétitives manuelles seront confiées à des robots et les tâches cognitives répétitives seront confiées à l'IA. Concernant cela, deux visions s'opposent :

²⁵ À noter : la France a adopté le Règlement européen sur la protection des données personnelles (REPD) – entré en vigueur le 15 mai 2018

Pour plus d'information : <https://www.cnil.fr/fr/reglement-europeen-sur-la-protection-des-donnees-ce-qui-change-pour-les-professionnels>

a) Regard optimiste

Cette vision projette que l'attribution de certaines tâches aux robots aurait des effets positifs pour les travailleurs. Premièrement, l'automatisation intelligente de tâches dangereuses ou effectuées dans des environnements dangereux permettrait de préserver la santé physique des travailleurs (Fernández-Macías *et al.*, 2018; Horton *et al.*, 2018). Par exemple, dans le secteur minier, des tâches effectuées dans les souterrains sont effectuées par des drones ou autres machines qui sont pilotés à distance par des travailleurs²⁶ (Landry, 2018). Ensuite, il est aussi question de l'automatisation intelligente des tâches routinières ou répétitives (Horton *et al.*, 2018). Cela peut autant avoir un impact positif sur la santé physique que psychologique. De plus, les travailleurs pourraient être davantage satisfaits de leur emploi (Horton *et al.*, 2018).

Ainsi, les risques liés à des expositions diverses peuvent être éliminés (p. ex. : tâches répétitives, poussière, substances toxiques, électricité, etc.) et une réduction des lésions pourrait aussi être observée (p. ex. : lombalgies (INRS, 2016)).

b) Regard pessimiste

Cette vision craint que le travailleur ne soit attiré qu'à des tâches de surveillance des machines autonomes. En conséquence, le travailleur pourrait ressentir une perte de contrôle sur son travail (diminution de la marge de manœuvre), une perte d'autonomie, une perte d'expertise, ainsi qu'une perte de sens de la valeur ou de l'utilité du travail accompli (Fernández-Macías *et al.*, 2018; INRS, 2016; Marsot, 2018).

Ensuite, d'autres effets négatifs anticipés réfèrent davantage aux pertes d'emploi des travailleurs peu scolarisés (HSE, 2017) et qui risquent de se retrouver dans des emplois où les conditions de travail sont mauvaises (Stacey *et al.*, 2017).

4.3.3.3 Travailler au rythme des machines

Une autre préoccupation liée à la cohabitation humain-machine est liée à la possibilité de mettre de la pression aux travailleurs afin qu'ils travaillent au rythme des machines ou du système autonome (INRS, 2016).

Des systèmes de gestion de données pourraient organiser le travail. En se faisant imposer une certaine organisation du travail et la réalisation de tâches par un système autonome, le travailleur pourrait voir ses marges de manœuvre et son autonomie réduites. De plus, le système autonome pourrait avoir comme principal objectif d'améliorer la productivité et considérer que l'humain peut travailler au maximum de sa capacité pendant tout son quart de travail, comme la machine. Cela pourrait nuire à la santé physique et psychologique du travailleur en augmentant les blessures ou causant des troubles psychologiques (INRS, 2016). Toutefois, l'inverse est aussi vrai. Certains croient qu'un tel système pourrait prendre en considération les ressources et contraintes et répartir efficacement les contraintes entre les travailleurs.

²⁶ Dans cet exemple, il est question d'automatisation. Dans l'I4.0, ultimement, le drone serait complètement autonome.

Le système à commande vocale (*voice picking*) : une expérience à garder en tête

Depuis plusieurs années les systèmes de guidage vocal, communément appelé « *voice pick* », sont utilisés par les préparateurs de commandes dans plusieurs entreprises. Cet outil ne pourrait plus être caractérisé de « nouvelle technologie ». Or, un parallèle entre les enjeux que cette technologie soulève en SST peut-être fait avec l'I4.0.

Premièrement, une des motivations à l'introduction de cet appareil est l'amélioration de la productivité globale (environ 10 à 15 %). Ces résultats, confirmés en entreprise, encouragent le maintien de cette technologie. Comme le concept d'I4.0, la motivation première est généralement de l'ordre du productif et moins lié à la SST.

Cet outil consiste en un casque d'écoute à reconnaissance vocale qui dicte au fur et à mesure les objets à prendre aux manutentionnaires. Ceux-ci doivent systématiquement confirmer la réalisation de chaque tâche dans l'ordre défini par le système.

Pour un aperçu du vécu du manutentionnaire : https://www.francetvinfo.fr/economie/emploi/video-cash-investigation-travail-vis-ma-vie-de-manutentionnaire-chez-lidl_2381539.html

Voici quelques enjeux soulevés par l'INRS (Govaere, 2009) et le reportage de « *Cash investigation* »²⁷ avec lesquelles il est possible de faire un parallèle avec l'I4.0 :

- **Monitoring de l'activité des travailleurs** : le reportage fait état d'un cas d'utilisation pour monitorer la performance des travailleurs et faire pression sur ceux-ci pour augmenter leur productivité (intensification du travail – tonnage journalier)
- **Organisation du travail dicté par le système** : cause une suppression de l'autonomie et une dépendance à la machine – sentiment de devenir un robot. Les marges de manœuvre (ex. : palettisation et ordre de cueillette) et le sentiment de contrôle de l'activité sont réduits. Cela rend le métier moins attrayant et cause plus de roulement. Aussi, le travailleur peut travailler à son rythme, mais la commande envoyée en continu l'encourage à donner une « réponse » (manutention) rapidement et cause une augmentation du rythme, de la cadence et du tonnage journalier. L'INRS parle d'une « course auto-alimentée ».
- **Déshumanisation du travail** : avec le casque d'écoute, le travailleur se voit couper de son environnement. Toutes ses paroles sont considérées par le système. Ainsi, les interactions avec les collègues se voient nettement réduites (réduction du lien social et du collectif de travail) et les interactions se font avec la machine. De plus, l'attention soutenue aux commandes vocales crée une diminution de la conscience de l'effort et de la perception de l'environnement et peut augmenter la charge mentale.

Ainsi, l'I4.0 ne soulève pas que de nouveaux enjeux SST. Il est important de considérer les expériences passées liées à l'introduction de certaines technologies et de transposer, lorsque pertinent, les approches de prévention. Le cas de l'introduction du *voice picking* qui a trop peu considéré le facteur humain dans les activités de l'entreprise en est un exemple.

²⁷ https://www.francetvinfo.fr/replay-magazine/france-2/cash-investigation/cash-investigation-du-mardi-26-septembre-2017_2380043.html

4.4 Avenues de recherche

Comme peu d'études ont été réalisées sur l'I4.0 et la SST, les possibilités d'avenues de recherche sont nombreuses. Pour aborder cette thématique, Badri *et al.* (2018) et Polak-Sopinska *et al.* (2020) mettent l'emphase sur l'importance de la recherche multidisciplinaire et de mettre à profit l'expertise dans le domaine de l'ergonomie et des sciences humaines.

Plusieurs risques sont anticipés avec l'arrivée de l'I4.0, mais la **santé psychologique** devra recevoir une attention particulière et occuper une plus grande place dans les projets d'ingénierie (Badri *et al.*, 2018; Polak-Sopinska *et al.*, 2020). Ainsi, **le développement d'environnements 4.0 devra se centrer sur la place des travailleurs** (approche centrée sur le travailleur), leur sécurité et leur confort. Stacey *et al.* (2017) rapportent que les experts consultés étaient surtout interpellés par les risques psychosociaux en lien avec la surcharge cognitive et émotionnelle causée par l'automatisation intelligente et le stress relié au travail.

Selon, l'étude du CEFRIO (Bourget *et al.*, 2017) les dirigeants d'entreprises sont principalement intéressés à la robotisation. Cela supporte Badri *et al.* (2018) qui soulignent que la **cohabitation entre humains et machines** est au cœur de l'I4.0 et qu'il s'agit d'un enjeu important à considérer en SST. Ces machines autonomes comprennent autant les cobots, les voitures, les drones que les systèmes informatiques. Toutefois, ces études gagneront à utiliser une approche centrée sur le travailleur qui considère son activité de travail réelle.

En plus, voici les éléments qui ont émergé de la littérature consultée :

- Clarifier les concepts : termes à utiliser, définitions, création d'une typologie de l'humain dans l'I4.0, etc.
- Documenter les risques en SST qui résulteront de l'introduction des nouvelles technologies
- Formation en entreprise 4.0
- Conséquences de l'I4.0 sur l'organisation du travail
- Culture de SST dans l'I4.0 (p. ex. : impact des nouveaux modèles de gestion sur la SST, intégration des nouvelles technologies, etc.)
- Cybersécurité

Le **monitorage des travailleurs** pourrait représenter une préoccupation importante des partenaires (syndicats et employeurs). L'utilisation des données sur les travailleurs et les relations employés employeurs ont reçu peu d'attention de la recherche (Fernández-Macías *et al.*, 2018).

Comme nous sommes encore dans les débuts de l'I4.0, il sera important d'agir en amont des transformations et de réfléchir à leurs impacts possibles sur les travailleurs. Grâce à des analyses du travail réel et à l'implication des travailleurs dans les processus de transformation incluant des simulations du travail futur, il sera possible d'identifier les technologies répondant aux besoins réels des travailleurs et de l'entreprise au lieu d'identifier une technologie à implanter et ensuite tenter de lui trouver une utilité. Finalement, les approches multidisciplinaires qui considèrent l'activité de travail réelle permettront d'aborder la question de manière systémique, celle-ci étant plus adaptée à l'interconnectivité et à la flexibilité de l'I4.0.

RÉFÉRENCES

- CATA Alliance et ScienceTech Communications. (2017). *Le secteur manufacturier avancé : enquête sur l'automatisation du secteur manufacturier au Québec*. Montréal, QC: CATA et ScienceTech Communications.
- Badri, A., Boudreau-Trudel, B. et Souissi, A. S. (2018). Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? *Safety Science*, 109, 403-411. doi: 10.1016/j.ssci.2018.06.012
- Barcellini, F. (2019). Industrie du futur : quelle place pour le travail et ses transformations? Dans E. Bourdu, M. Lallement, P. Veltz et T. Weil (Édit.), *Le travail en mouvement* (p. 136-147). Paris, France: Presse des Mines.
- Barthélémy, J. et Cette, G. (2017). *Travailler au XXI^e siècle : l'ubérisation de l'économie?* Paris, France: Odile Jacob.
- Basque, J. et Lundgren-Cayrol, K. (2002). Une typologie des typologies des applications des TIC en éducation. *Sciences et techniques éducatives*, 9(3-4), 263-289.
- Bourget, C., Badraoui, G., Hébert, P., Duhamel, M., Moudallal, M. et Dessureault, P. (2017). *Industrie 4.0 : enquête auprès des entreprises manufacturières du Québec*. Québec, QC: CEFRIO.
- Centre facilitant la recherche et l'innovation dans les organisations. (2017). *Portrait des pratiques numériques des entreprises manufacturières de la région de la Capitale-Nationale*. Tiré de <https://www.quebecinternational.ca/fr/nouvelles/portrait-des-pratiques-numeriques-des-entreprises-manufacturieres-de-la-region-de-la-capitale-nationale>
- Chaumon Bobillier, M.-E. (2017). Du rôle des tic dans la transformation digitale de l'activité et de la santé au travail. *La revue des conditions de travail*, 6, 16-24.
- Chiarello, F., Trivelli, L., Bonaccorsi, A. et Fantoni, G. (2018). Extracting and mapping industry 4.0 technologies using Wikipedia. *Computers in Industry*, 100, 244-257. doi: 10.1016/j.compind.2018.04.006
- Danjou, C., Rivest, L. et Pellerin, R. (2017). *Industrie 4.0 : des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité*. CEFRIO.
- Daugherty, P. R. et Wilson, H. J. (2018). *Human + machine: Reimagining work in the age of AI*. Boston, MA: Harvard Business Review Press.
- Degryse, C. (2017). *Façonner le monde du travail dans l'économie digitale*. European Trade Union Institute. Tiré de <https://www.etui.org/fr/publications/notes-de-prospective/faconner-le-monde-du-travail-dans-l-economie-digitale>
- Deloitte. (2015). *Industry 4.0.: Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies*. Zurich, Suisse: Deloitte AG. Tiré de <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/manufacturing/ch-en-manufacturing-industry-4-0-24102014.pdf>
- Désaunay, C. (2017). La déconnexion au travail, nouvelle norme? *Hygiène et sécurité du travail*, 247, 98-99.
- Eurofound. (2016). *Programming document 2017-2020*. Tiré de https://www.eurofound.europa.eu/sites/default/files/ef_publication/field_ef_document/ef1659en.pdf
- Fernández-Macías, E. (2018). *Automation, digitalisation and platforms: Implications for work and employment* (Rapport n° EF/18/002). Dublin, Irlande: Eurofound. Tiré de [eurofound.link/ef18002](https://www.eurofound.europa.eu/sites/default/files/ef_publication/field_ef_document/ef18002en.pdf)
- Fernández-Macías, E., Hurley, J., Peruffo, E., Storrie, D., Poel, M. et Packalén, E. (2018). *Game changing technologies: Exploring the impact on production processes and work*. Dublin, Irlande: Eurofound. Tiré de

- https://www.eurofound.europa.eu/sites/default/files/ef_publication/field_ef_document/fomeef18001en.pdf
- Frey, C. B. et Osborne, M. (2013). The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation? *Oxford Martin School Working Paper*. Tiré de <https://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/academic/future-of-employment.pdf>
- Govaere, V. (2009). La préparation de commandes en logistique : mutations technologiques et évolution des risques professionnels. *Hygiène et sécurité du travail*, 214(9), 3-14.
- Health and Safety Executive. (2017). *Foresight report 2016: Digital revolution and the changing face of work*. Buxton, Angleterre: HSE.
- Hermann, M., Pentek, T. et Otto, B. (2016). *Design principles for Industrie 4.0 scenarios: A literature review*. Communication présentée à la 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Koloa, Hawaï (p. 3928-3937). doi: 10.1109/HICSS.2016.488
- Héry, M. et Malenfer, M. (2018). Évolution des modes de production et risques professionnels : un état des lieux de la veille en 2017. *Hygiène et sécurité du travail*, 251, 108-115.
- Horizons de politiques Canada. (2016a). *Le Canada et le changement de la nature du travail*. Tiré de <http://www.horizons.gc.ca/fr/file/18717>
- Horizons de politiques Canada. (2016b). *Le futur de l'apprentissage et de la formation : scan environnemental*. Tiré de <http://www.horizons.gc.ca/fr/file/17090>
- Horton, J., Cameron, A., Devaraj, D., Hanson, R. et Hajkowicz, S. (2018). *Workplace safety futures: The impact of emerging technologies and platforms on work health and safety and workers' compensation over the next 20 years*. Canberra, Australie: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. Tiré de <https://www.data61.csiro.au/en/Our-Work/Future-Cities/Planning-sustainable-infrastructure/workplacesafety>
- Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. (2018). *Plan quinquennal de production scientifique et technique 2018-2022*. Montréal, QC: IRSST. Tiré de <https://www.irsst.qc.ca/Portals/0/upload/5-institut/Plan/plan-quinquennal-2018-2022.pdf>
- Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles. (2016). *Modes et méthodes de production en France en 2040 : quelles conséquences pour la santé et la sécurité au travail?* (Rapport n° VEP 3). Paris, France: INRS. Tiré de <http://www.inrs.fr/dms/inrs/CataloguePapier/ED/TI-VEP-3/vep3.pdf>
- Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles. (2018). *Orientations 2018-2022 : santé et sécurité au travail* (Rapport n° ED 4484). Paris, France: INRS. Tiré de <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%204484>
- Landry, K. (2018). Les drones souterrains, nouveauté sur le marché! *Le Belmine*, 50, 5. Tiré de <http://www.cnesst.gouv.qc.ca/Publications/600/Documents/DC600-410-50web.pdf>
- Li, X., Li, D., Wan, J., Vasilakos, A. V., Lai, C. F. et Wang, S. (2017). A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0. *Wireless Networks*, 23(1), 23-41. doi: 10.1007/s11276-015-1133-7
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. d. F. R. et Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0: A systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55(12), 3609-3629. doi: 10.1080/00207543.2017.1308576
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1-10. doi: 10.1016/j.jii.2017.04.005
- Marsot, J. (2018). L'industrie du futur : de quoi parle-t-on? *Hygiène et sécurité du travail*, 253, 6-10.

- Ministère de l'Économie de la Science et de l'Innovation du Québec. (2016). *Plan d'action en économie numérique : pour l'excellence numérique des entreprises et des organisations québécoises*. Québec, QC: MESI. Tiré de https://www.economie.gouv.qc.ca/fileadmin/contenu/documents_soutien/strategies/economie_numerique/paen.pdf
- National Institute for Occupational Safety and Health. (2018). NIOSH Strategic Plan: FYs 2019–2023, research goals. Tiré de <https://www.cdc.gov/niosh/about/strategicplan/researchgoals.html>
- Neugebauer, R., Hippmann, S., Leis, M. et Landherr, M. (2016). Industrie 4.0: From the perspective of applied research. *Procedia CIRP*, 57, 2-7. doi: 10.1016/j.procir.2016.11.002
- Organisation de coopération et de développement économiques. (2016). *Automatisation et travail indépendant dans une économie numérique*. Paris, France: OCDE. Tiré de <https://www.oecd.org/fr/els/emp/Automatisation%20et%20travail%20ind%C3%A9pendant%20dans%20une%20%C3%A9conomie%20num%C3%A9rique.pdf>
- Partenariat pour la recherche européenne en santé et sécurité au travail. (2013). *Lieux de travail durables : priorités pour la recherche européenne en santé et sécurité du travail à l'horizon 2020*. Paris, France: PEROSH. Tiré de <http://www.perosh.eu/wp-content/uploads/2013/07/Brochure-Perosh-F.pdf>
- Pellerin, R., Rivest, L. et Danjou, C. (2016). *Prendre part à la révolution manufacturière?: Du rattrapage technologique à l'Industrie 4.0 chez les PME*. Québec, QC: CEFRIO.
- Perales, D. P., Valero, F. A. et García, A. B. (2018). *Industry 4.0: A classification scheme*. Dans E. Viles, M. Ormazábal et A. Lleó (Édit.), *Closing the gap between practice and research in industrial engineering* (p. 343-350). Cham, Suisse: Springer.
- Polak-Sopinska, A., Wisniewski, Z., Walaszczyk, A., Maczewska, A. et Sopinski, P. (2020). Impact of Industry 4.0 on occupational health and safety. Dans W. Karwowski, S. Trzcielinski et B. Mrugalska (Édit.), *Advances in manufacturing, production management and process control: Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Human Aspects of Advanced Manufacturing, and the AHFE International Conference on Advanced Production Management and Process Control, July 24-28, 2019, Washington D.C., USA* (p. 40-52). Cham, Suisse: Springer.
- Posada, J., Toro, C., Barandiaran, I., Oyarzun, D., Stricker, D., de Amicis, R., . . . Vallarino, I. (2015). Visual computing as a key enabling technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 35(2), 26-40. doi: 10.1109/mcg.2015.45
- Romero, D., Stahre, J., Wuest, T., Noran, O., Bernus, P., Fath, F.-B. Å. et Gorecky, D. (2016). *Towards an operator 4.0 typology: A human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies*. Communication présentée à l'International Conference on Computers and Industrial Engineering (CIE46), Tianjin, Chine.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P. et Harnisch, M. (2015). *Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries*. Boston, MA: The Boston Consulting Group. Tiré de http://image-src.bcg.com/Images/Industry_40_Future_of_Productivity_April_2015_tcm79-61694.pdf
- Schwab, K. (2017). *La quatrième révolution industrielle*. Malakoff, France: Dunod.
- St-Vincent, M., Vézina, N., Bellemare, M., Denis, D., Ledoux, É. et Imbeau, D. (2011). *L'intervention en ergonomie*. Québec, QC: Éditions MultiMondes.
- Stacey, N., Ellwood, P. a., Bradbrook, S., Reynolds, J. et Williams, H. (2017). *Key trends and drivers of change in information and communication technologies and work location: Foresight on new and emerging risks in OSH*. Luxembourg, Luxembourg: Publications Office of the European Union.

- Statistique Canada. (29 juin 2020). Étude : l'automatisation et la transformation des emplois au Canada : qui est à risque? *Le Quotidien*. Tiré de <https://www150.statcan.gc.ca/n1/fr/daily-quotidien/200629/dq200629d-fra.pdf?st=rlfeU4b8>
- Steijn, W., van der Vorm, J., Luijff, E., Gallis, R. et van der Beek, D. (2016). *Emergent risks to workplace safety as a result of IT connections of and between work equipment* (Rapport n° TNO 2016 R11143). Utrecht, Pays-Bas: TNO. Tiré de <http://publications.tno.nl/publication/34622295/QDXZqU/steijn-2016-emergent.pdf>
- Thoben, K.-D., Wiesner, S. A. et Wuest, T. (2017). Industrie 4.0 and smart manufacturing: A review of research issues and application examples. *International Journal of Automation Technology*, 11(1), 4-16. doi: 10.20965/ijat.2017.p0004
- TNO. (2017). *Flywheel of innovation in the Netherlands : Strategic plan 2018-2021*. Tiré de https://www.tno.nl/media/9441/tno_strategic_plan_2018_2021.pdf
- Trappey, A. J. C., Trappey, C. V., Govindarajan, U. H., Chuang, A. C. et Sun, J. J. (2017). A review of essential standards and patent landscapes for the Internet of Things: A key enabler for Industry 4.0. *Advanced Engineering Informatics*, 33, 208-229. doi: 10.1016/j.aei.2016.11.007
- Vézina, N. (2001). La pratique de l'ergonomie face aux TMS : ouverture à l'interdisciplinarité. Dans *Comptes rendus du congrès SELF-ACE 2001 : les transformations du travail, enjeux pour l'ergonomie* (p. 44-60). Mantes la Jolie, France: SELF.
- Zeng, J., Yang, L. T., Lin, M., Ning, H. et Ma, J. (2020). A survey: Cyber-physical-social systems and their system-level design methodology. *Future Generation Computer Systems*, 105, 1028-1042. doi: 10.1016/j.future.2016.06.034
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E. et Newman, S. T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A review. *Engineering*, 3(5), 616-630. doi: 10.1016/j.eng.2017.05.015

ANNEXE 1 : MOTS CLÉS ET CRITÈRES DE SÉLECTION DES PUBLICATIONS

Tableau 1. Aperçu des mots clés utilisés pour recenser les publications selon l'objectif poursuivi

Objectif	Aperçu des mots clés utilisés
<i>Objectif 1</i>	Classification (caractérisation, cartographie, catégorisation, définition, délimitation, <i>mapping</i> , etc.) Industrie 4.0 (4 ^e révolution industrielle, intelligence artificielle, automatisation, développement technologique, économie digitale, révolution digitale, nouvelles technologies, révolution numérique, etc.) Revue de littérature (méta-analyse, revue, <i>review</i> , <i>state of the art</i> , etc.)
<i>Objectifs 2 et 3</i>	Industrie 4.0 (4 ^e révolution industrielle, intelligence artificielle, automatisation, développement technologique, économie digitale, révolution digitale, nouvelles technologies, révolution numérique, etc.) Monde du travail (travailleurs, métier, occupation, professionnel, travail, <i>occupational</i> , <i>workplace</i> , etc.) Impact (conséquence, évolution, mutation, transformation, etc.)
<i>Objectif 4</i>	Industrie 4.0 (4 ^e révolution industrielle, intelligence artificielle, automatisation, développement technologique, économie digitale, révolution digitale, nouvelles technologies, révolution numérique, etc.)

Tableau 2. Critères d'inclusion et d'exclusion des articles

Critères d'inclusion	Critères d'exclusion
<u>Objectif 1</u> Type de littérature : grise et scientifique Publication : à partir de 2010 Langues : français et anglais	<u>Objectif 1</u> Aucune description de l'I4.0 ou de ce qui la compose <u>Objectifs 2 et 3</u> Aucun lien avec le travail ou la SST Cible une technologie en particulier (n'a pas un regard général sur l'I4.0)
<u>Objectifs 2 et 3</u> Type de littérature : grise et scientifique Publication : à partir de 2016 Langues : français et anglais	

Tableau 3. Bases de données interrogées

Bases de données	Date d'interrogation	
	Recherche 1 <i>Objectif 1</i>	Recherche 2 <i>Objectif 2 et 3</i>
Blogues SST	Avril 2018	Mai 2018
CCHST		
Current Contents		
Ei Compendex		
Embase		
Ergonomics Abstracts		
ERIC		
Google Scholar		
ISST		
NTIS		
OSH UPDATE		
Pascal et Francis en accès libre		
PubMed		
ProQuest Dissertations and Theses Professional		
Sci Search		
Social SciSearch		

Tableau 4. Nombre de documents sélectionnés pour chaque objectif

Objectif	Nombre de documents (articles scientifiques, rapports et livres)
Objectif 1	18
Objectifs 2 et 3	25
Objectif 4	19 ²⁸

Certains documents ont été utilisés pour répondre à plus d'un objectif; les articles ajoutés en 2020 ne sont pas inclus dans ce tableau.

²⁸ 19 documents de 13 institutions de recherche en SST

ANNEXE 2 : DÉFINITIONS DES PRINCIPALES TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE 4.0

Internet des objets (IdO):

L'IdO est une infrastructure où les éléments physiques, les systèmes, les sources d'information et les services intelligents sont interconnectés (Danjou *et al.*, 2017). Ces interconnexions permettent l'échange de données entre le monde physique et virtuel ainsi que, dans le contexte de l'I4.0, une prise de décision décentralisée et des actions en temps réel (Danjou *et al.*, 2017).

Système cyberphysique (CPS) :

Dans le cadre de l'I4.0, les CPS sont constitués de capteurs et d'actionneurs. Les capteurs permettent la circulation d'information, tandis que les actionneurs surveillent et agissent sur les éléments physiques du système (Danjou *et al.*, 2017). Ainsi, les CPS permettent d'échanger de l'information, de surveiller et de réaliser des actions de manière autonome (Kagermann *et al.*, 2013²⁹).

Capteurs :

Les capteurs collectent de l'information sur le fonctionnement du système. Cette information est acheminée, grâce à l'Internet des objets, vers des systèmes ou ordinateur qui pourra comptabiliser, analyser et traiter les données (Fernández-Macías, 2018). En plus, les capteurs font partie intégrante des CPS et permettent leur bon fonctionnement. Ils peuvent être intégrés dans presque tout type de structure (HSE, 2017). Par exemple, ils peuvent être intégrés dans des pneus, des robots, des matériaux de construction, des nanomatériaux pouvant circuler dans le sang, des moteurs d'avions ou encore, dans l'estomac des vaches.

Méga données ou données massives :

Cette expression fait référence à des données diversifiées et disponibles en très grande quantité. L'analyse de ces données permet de comprendre une situation complexe pour identifier la meilleure action possible (Danjou *et al.*, 2017). Dans l'I4.0, ces données peuvent provenir d'endroits variés comme de la chaîne de production, du produit, des employés, des clients, etc.

L'infonuagique :

L'infonuagique, ou le « cloud », permet de donner accès à de l'information n'importe où et n'importe quand. L'information peut ainsi être partagée facilement notamment entre différents acteurs et systèmes d'exploitation (NIST, 2011³⁰). Dans le cadre de l'I4.0, cela facilite le partage des données du fonctionnement de l'entreprise autant au sein même de celle-ci, qu'avec des entités externes (Danjou *et al.*, 2017).

²⁹ Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 WG

³⁰ NIST - Mell, P. et Grance, T. (2011). The NIST definition of cloud computing. NIST Special Publication, 800-145

Machines autonomes ou robotique de pointe :

« Dans le paradigme de l'Industrie 4.0, les machines sont dotées de nouvelles technologies de connectivité et deviennent plus autonomes, plus flexibles et coopératives. Elles interagissent les unes avec les autres et vont jusqu'à opérer avec les humains de façon sécuritaire (cobotique) » (Danjou *et al.*, 2017).

L'intelligence artificielle (IA) :

L'IA vise à reproduire l'intelligence humaine, soit sa capacité d'apprentissage, de prise de décision et d'action. Cela peut être réalisé grâce à différentes ressources, comme les réseaux de neurones et l'apprentissage automatique (Danjou *et al.*, 2017). Dans le contexte de l'I4.0, l'IA peut notamment guider la prise de décision et gérer les actions du système (p. ex. : faire fonctionner des machines de manière autonome) (Danjou *et al.*, 2017).

Réalité augmentée (RA) :

La RA consiste à superposer des images virtuelles sur des éléments de l'environnement réel (Danjou *et al.*, 2017). Par exemple, dans l'I4.0, un travailleur pourrait porter des lunettes de RA qui permettraient de superposer des informations virtuelles sur les machines qui demandent un entretien. Ces informations pourraient guider le travailleur dans ses tâches.

Réalité virtuelle (RV) :

« Technologie permettant une simulation interactive et en temps réel de la réalité, par la création par ordinateur, à l'aide d'images de synthèse, d'un environnement virtuel en 3D dans lequel on peut évoluer, et procurant la sensation d'une immersion dans un monde réel »³¹.

³¹ Office québécois de la langue française : http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8391371