

CIGI QUALITA MOSIM 2023

DÉFIS DE SST DES TECHNOLOGIES AUTONOMES DANS LE CONTEXTE DE L'INDUSTRIE 4.0 : CAS DES VAG ET DES COBOTS

MOHAMED NACEUR BEN AZIZA¹, JEMAI HAJER², BADRI ADEL³, KELOUWANI SOUSSO⁴, CLAYTON PETERSON⁵,
MARTIN RIVARD⁶

¹ ÉCOLE DE GESTION, UQTR
Trois-Rivières, Canada
Mohamed.Naceur.Ben.Aziza@uqtr.ca

² DÉPARTEMENT DE GÉNIE INDUSTRIEL, UQTR
Trois-Rivières, Canada
Hajer.Jemai@uqtr.ca

³ DÉPARTEMENT DE GÉNIE INDUSTRIEL, UQTR
Trois-Rivières, Canada
Adel.Badri@uqtr.ca

⁴ DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE, UQTR
Trois-Rivières, Canada
Souso.Kelouwani@uqtr.ca

⁵ DÉPARTEMENT DE PHILOSOPHIE ET DES ARTS, UQTR
Trois-Rivières, Canada
Clayton.Peterson@uqtr.ca

⁶ CÉGEP DE DRUMMONDVILLE
Trois-Rivières, Canada
Martin.Rivard@cegepdrummond.ca

Résumé – Les véhicules autoguidés (VAG) et les robots collaboratifs (Cobots) représentent, depuis quelques années, de nouvelles technologies qui intègrent de plus en plus le milieu de travail, dans le cadre de la quatrième révolution industrielle (Industrie 4.0). Bien que la présence de ces nouveaux arrivants vienne principalement dans un contexte d'innovation et d'amélioration des processus, il se trouve que, en termes de santé et de sécurité au travail (SST), plusieurs opportunités et défis accompagnent leur arrivée. Dans le cadre de cette revue de la littérature, nous avons mis la lumière sur la problématique de sécurité et sur l'impact de l'intégration des VAG et des cobots dans l'industrie en explorant des publications récentes à ce sujet. Les résultats de cette revue nous ont permis d'explorer les différentes opportunités liées à l'intégration des VAG et des cobots en milieu industriel et d'avoir une idée sur quelques-unes des principaux défis en SST auxquels font face les entreprises utilisant ces nouvelles icônes de la technologie, de l'intelligence et de l'autonomie.

Mots clés – Véhicule autoguidé (VAG), robot collaboratif (Cobot), santé et sécurité du travail (SST), Industrie 4.0.

Abstract – Autonomous guided vehicles (AGVs) and collaborative robots (Cobots) have been new technologies that are increasingly integrating the workplace for several years, as part of the fourth industrial revolution (Industry 4.0). Although the presence of these newcomers comes mainly in a context of innovation and process improvement, it turns out that, in terms of occupational health and safety (OHS), several opportunities and challenges accompany their arrival. As part of this literature review, we have shed light on the security issue and on the impact of the integration of AGVs and cobots in the industry by exploring recent publications on this subject. The results of this review allowed us to explore the different opportunities related to the integration of AGVs and cobots in an industrial environment and to have an idea of some of the main OHS challenges for companies using these new technologies, smartness, and autonomy icons.

Keywords – Autonomous guided vehicle (AGV), collaborative robot (Cobot), occupational health and safety (OHS), Industry 4.0.

1 INTRODUCTION

La tendance de la numérisation, l'automatisation, l'utilisation croissante des technologies de l'information et de la communication (TIC) et la robotisation présente des atouts majeurs dans le passage des entreprises vers l'industrie moderne. Au fil des années, le monde n'a jamais cessé d'évoluer et la quatrième révolution industrielle ou l'Industrie 4.0 devient la réalité prédominante (**Figure 1**).

Les robots, les cobots et les VAG représentent des icônes de l'avancement technologique depuis quelques décennies. Ils ont été présentés, depuis le début comme équivalents à l'intelligence artificielle et au développement de l'intelligence humaine. Depuis 2011 et le début de la quatrième révolution industrielle, plusieurs technologies ont pris le devant et commencent à intégrer de plus en plus les milieux de travail, et surtout l'industrie.

Ceci est pour plusieurs raisons, reliées surtout à la recherche d'une meilleure productivité, d'une réduction des coûts de production, d'une meilleure qualité, mais aussi d'une meilleure sécurité.

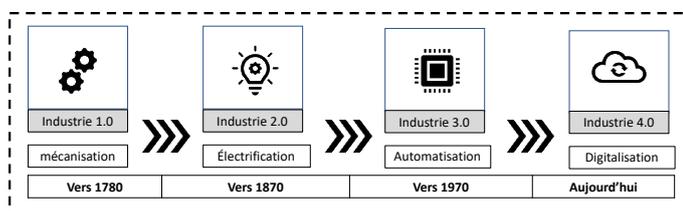


Figure 1. Révolutions industrielles au cours des années

Les apports des VAG et des cobots en matière de productivité, d'autonomie et de qualité sont évidents (Badri et al., 2018). En effet, les VAG et cobots sont capables d'effectuer des tâches dangereuses, répétitives, ou dans des conditions de travail extrêmes avec une grande précision et de collaborer avec les travailleurs pour une meilleure performance.

Les défis de santé et de sécurité liés à l'usage croissant des VAG et des cobots sont multiples (Ben Aziza et al., 2020). En effet, le changement rapide et parfois radical des milieux de travail n'est pas nécessairement suivi par une adaptation des gestionnaires et des travailleurs à la nouvelle réalité. Au contraire, la résistance aux changements représente un comportement typique pour plusieurs joueurs en milieu industriel et présente, en elle-même, un des défis à surmonter afin d'assurer une transition fluide vers l'Industrie 4.0.

En santé et sécurité du travail (SST), l'adaptation au nouveau contexte requiert un ajustement et une mise à jour des mesures de prévention, des mesures de sécurité, des méthodes de gestion, et un changement des comportements humains et des façons de faire. En absence de telles mesures, la santé et la sécurité des travailleurs seront grandement impactées.

Dans le cadre de cet article, nous présenterons une revue de la littérature quant à la problématique de la SST reliée à l'utilisation des VAG et des cobots. Ceci tout en analysant, avec un œil critique, les constats tirés de la littérature afin de résumer les opportunités, les défis et les mesures de sécurité utilisées ou proposées pour affronter plusieurs difficultés. En guise de conclusion de l'article, quelques recommandations seront indiquées.

2 MÉTHODOLOGIE

2.1 Revue bibliographique

Dans le cadre de cette revue de la littérature, nous avons opté pour une recherche des titres et des résumés par mots clés en associant le choix des termes à la robotique collaborative et aux

VAG. Nous avons considéré principalement la base de données multidisciplinaires Scopus, vu son large étendue scientifique. Les résultats examinés étaient ceux des cinq dernières années. Ce choix a été fait pour favoriser les publications récentes, vu que le sujet de recherche est d'actualité et que le nombre de publications a connu un rebond depuis les cinq dernières années.

2.2 Critères de recherche bibliographique

Pour avoir des résultats significatifs et pertinents, nous avons considéré dans notre recherche, les termes en anglais les plus utilisés dans la littérature comme synonymes des véhicules auto guidés et robots collaboratifs (Collaborative robot, cobot, autonomous intelligent vehicle, autonomous guided vehicle, VAG), et les termes en anglais en lien avec la santé et la sécurité du travail (OHS, safety, health, security) :

```
(TITLE-ABS-KEY ("collaborative robot" OR "cobot") AND ("OHS" OR "safety" OR "security" OR "health")) OR TITLE-ABS-KEY ("autonomous intelligent vehicle" OR "AIV" OR "autonomous guided vehicle" OR "AGV") AND ("OHS" OR "safety" OR "security" OR "health")) AND PUBYEAR > 2017 AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENGI"))
```

En analysant les résultats, nous avons sélectionné 45 publications les plus pertinentes en lien avec notre sujet de recherche, surtout en ce qui concerne l'intérêt aux opportunités et aux défis reliés aux aspects de la SST.

3 RÉSULTATS

3.1 Véhicules autoguidés (VAG) versus Cobots

Les VAG, comme leur nom l'indique, sont des véhicules intelligents qui permettent le transport de matériels d'une façon autonome. L'usage de ce type de véhicules a vécu un vrai essor au cours des dernières décennies, surtout dans le domaine de transport et de la logistique et dans les environnements de travail et les systèmes de production modernes. Les VAG représentent, sans doute, une des technologies les plus représentatives de l'Industrie 4.0 et de la tendance mondiale d'intégration des nouvelles technologies, de l'intelligence et de la connectivité en milieu industriel. Ceci dans le but d'améliorer la productivité, de réduire les coûts de production et de répondre à des exigences de développement durable (SST, écologie, etc.). La question de sécurité est bien présente dans le cadre de la transition vers l'Industrie 4.0. L'introduction de nouvelles technologies dans l'environnement de travail s'accompagne forcément avec des risques émergents en SST (Badri et al., 2018).

D'autre part, l'utilisation des robots dans le milieu industriel n'est, toutefois, pas récente. En effet, l'introduction des robots dans les chaînes de production dans le secteur automobile, par exemple, a commencé il y a plusieurs dizaines d'années. Le robot électrique a vu les jours dans les années 70. Néanmoins, depuis 2010, et dans le cadre de la quatrième révolution industrielle, le milieu industriel a vécu une nouvelle révolution de la robotique. Cette révolution se caractérise par l'intégration de plus en plus de robots qui fonctionnent en collaboration partielle ou totale avec les humains. De nature, cette collaboration entre humains et machines génère plusieurs inquiétudes, principalement en termes de sécurité. En effet, les mesures de sécurité qui se basaient, auparavant, sur l'éloignement de l'humain de la zone dangereuse des robots en installant principalement des protecteurs fixes, des rideaux lumineux ou des détecteurs de mouvements, ne sont plus suffisantes. Réellement, la nécessité de la collaboration fait en sorte que les travailleurs partagent avec les robots la même zone de travail ou au moins une partie de cette zone, et ne peuvent pas être séparés totalement. Cela dit, le défi de sécurité doit être

traité selon une philosophie complètement différente. Dans la littérature, les recherches faites sur l'intégration des cobots se sont intéressées à l'optimisation, à l'efficacité et aux aspects économiques et certains ont révoqué la problématique de sécurité (Jocelyn et al., 2017)).

Pauliková et al. (2021) ont donné un aperçu des effets négatifs possibles de l'interaction humain-cobot afin de pouvoir proposer, par la suite, des mesures préventives ou correctives. Néanmoins, le recours à la robotisation qui permette des gains économiques n'empêche pas la nécessité de la présence étroite de l'humain, vu que les systèmes automatisés ne peuvent pas fonctionner sans cette intervention hybride. L'humain est mieux placé pour effectuer certaines tâches que les robots ne maîtrisent pas comme, à titre d'exemple, le temps de réaction ou la gestion de situations imprévisibles. Cependant, il est impossible de prétendre que l'humain sera totalement en sécurité en présence des Cobots, surtout que les normes liées à la sécurité ne sont que récentes ou en cours d'élaboration. De nombreux accidents sur un lieu de travail robotisé se produisent lors des situations de fonctionnement non routinières telles que la programmation, la maintenance, les tests, la configuration ou la personnalisation. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre et de tester de nouvelles fonctionnalités de sécurité et de fournir des cobots intrinsèquement conformes pour maintenir la sécurité.

Valori et al. (2021) ont souligné les besoins émergents et les tendances possibles concernant les procédures de test de sécurité pour les applications des cobots, en se basant sur un aperçu du paysage des normes pertinentes pour la validation de la sécurité, et de décrire une nouvelle approche interdomaines basée sur les compétences et les protocoles de test de sécurité. Bien que l'utilisation de robots remplace les humains dans les tâches ennuyeuses, sales, dangereuses et délicates, mais leur généralisation dans plusieurs domaines et applications est actuellement limitée par les difficultés rencontrées lors de la validation de la sécurité de l'application robotique spécifique. L'interface humain-cobot peut être améliorée en mettant en œuvre différentes technologies, telles que la vision intégrée aux cobots, la reconnaissance vocale, les lunettes de la réalité augmentée et même la détection de bio signaux.

3.2 Les opportunités reliées aux VAG et Cobots

L'intégration des VAG et des Cobots dans le milieu industriel permet un gain important en temps et en énergie. En effet, le remplacement du transport manuel ou semi-automatisé par un transport complémentaire autonome sera plus efficace surtout en utilisant plusieurs véhicules en même temps. Les tâches faites par des cobots en collaboration avec les travailleurs sont aussi bénéfiques pour la santé physique et mentale des travailleurs comme pour la productivité et l'efficacité. En présence de ces technologies, des tâches répétitives, routinières et difficiles seront présentes sans impacter la santé physique et mentale des travailleurs (Ben Aziza et al., 2020). Le recours aux Cobots à un bénéfice économique dont l'amélioration de la productivité, en profitant de leurs capacités à accomplir les tâches plus rapidement que les humains (Ayoubi et al., 2019). L'implantation de cobots dans le même lieu de travail avec des humains a plusieurs opportunités. Sur le plan économique, il est plus rentable de remplacer les travailleurs par des cobots. En fait, un cobot peut remplacer plusieurs travailleurs durant la journée (plus efficace de l'introduire dans des productions multiéquipes). Il peut également travailler plus d'heures que l'humain, etc. Il est favorable que la robotisation remplace le travail des individus ou de groupes de salariés, car il permet d'augmenter la productivité ainsi que la qualité des produits. Les cobots améliorent considérablement l'ergonomie globale

des lieux de travail et évitent les opérations de travail pénibles et répétitives. Ils sont considérés comme un outil indispensable pour faire face à l'exposition de l'humain à des conditions de travail dangereuses. Le cobot est un véritable partenaire qui peut minimiser le risque de blessures liées au travail. En effet, l'utilisation des cobots dans les opérations dangereuses permet la réduction du stress lié au travail avec de lourdes charges ainsi que la réduction de l'apparition des lésions professionnelles (Pauliková et al., 2021).

Les cobots sont aussi utilisés en tant que dispositifs de soutien pour améliorer la sécurité des travailleurs et réduire les tâches répétitives ainsi que les blessures accidentelles. Généralement, les cobots sont spécialement conçus pour s'arrêter avant que tout contact involontaire ne puisse nuire au travailleur humain, et ils peuvent même avoir des capteurs supplémentaires pour détecter la pollution gazeuse ou ambiante (Aliev & Antonelli, 2021).

3.3 Les défis reliés aux VAG et cobots

3.3.1 Risques d'interférences et solutions proposées

Le risque lié à la collision est, sans doute, le risque le plus considéré dans la littérature si on s'intéresse aux aspects de la SST. En effet, et vu la nature des VAG qui se déplacent dans le milieu de travail tout en étant plus ou moins autonomes, le risque d'accident entre les VAG ou entre un VAG et un humain suscite une grande inquiétude et par conséquent un grand intérêt dans les différents articles scientifiques analysés (ajouter ici au moins deux références).

Les chercheurs analysant le problème de sécurité pour les VAG ont présenté des solutions pour faire face à ce grand défi à travers l'expérimentation de technologies, de méthodes de gestion du trafic, des mesures de sécurisation, des dispositifs à installer sur les véhicules, etc. Le risque de collision est, aussi, le principal risque qui découle d'une interaction humain-cobot. Généralement, les cobots sont équipés de détecteurs de collisions pour une interaction physique sûre entre l'humain et le cobot, mais le défi est de trouver un modèle de seuil précis de collision (Berox et al., 2022).

Les contacts étroits et fréquents avec les cobots peuvent menacer la sécurité des opérateurs, voire les blesser directement. Les clôtures électroniques ou les normes industrielles sont des méthodes de sécurité passive qui présentent certaines limites, comme une faible flexibilité et une sécurité en temps réel. Afin de garantir la sécurité des humains dans l'interaction homme-cobot, Yang et al. (2022) ont conçu un système de capteur tactile flexible qui pourrait améliorer la perception de la force des cobots.

Parmi les objectifs essentiels de l'introduction des cobots dans le milieu de travail industriel est l'augmentation de la productivité. Cependant, les restrictions liées à la sécurité et le bien-être des travailleurs peuvent engendrer une baisse de productivité. Alors, il est très important de bien se préparer avant d'introduire des cobots dans un milieu de travail. Berox et al. (2022) ont défendu la pertinence d'un modèle de grille de maturité intégré à un outil d'évaluation du niveau de préparation à la mise en œuvre des cobots. Les technologies reliées aux cobots se caractérisent par un compromis inhérent entre sécurité et efficacité et le manque de connaissances en matière de sécurité lors de leur introduction peut engendrer des risques physiques (collision), risques technologiques (cybersécurité) ou des risques psychosociaux (stress lié au travail). De plus, l'imprécision de la législation en matière de SST rend difficile sa traduction en mesure concrète (Berox et al., 2022).

La gestion du trafic entre les piétons et les VAG dans un environnement industriel contrôlé se fait généralement sous

deux contraintes : une contrainte de temps et une contrainte de sécurité. Le fait de partager le même environnement avec des humains rend l'efficacité et la sécurité du transport et des déplacements une mission difficile. Plusieurs techniques et stratégies sont actuellement utilisées afin d'arriver à une meilleure coordination entre piétons et VAG, surtout dans le cas d'un flux de plusieurs véhicules. L'évitement de collisions, la détection des piétons et l'affichage d'intentions sont, entre autres, des techniques sur lesquelles on se base pour optimiser les transports. M. Zhang et al. (2022) ont utilisé une technique de coordination entre piétons et véhicules moyennant un profil de vitesses et un comportement communicatif de passage. Cette approche a donné, après expérimentation, de meilleurs résultats comparés par le reste des approches d'évitement de collisions couramment utilisées à savoir, entre autres, le « Model Predictive Control approach ».

Park et al. (2022) se sont intéressés aux bénéfices éventuels qu'on peut avoir en intégrant des VAG dans des ports dotés de terminaux roulants (roll-on/roll-off), où les opérations de chargement et de déchargements dépendent encore des ressources humaines. L'objectif étant de réduire les risques causés par les erreurs humaines et chercher un niveau de sécurité plus élevé. Ceci en automatisant les opérations du terminal à l'aide des VAG. L'évaluation de l'impact de cette action sur la productivité, la rentabilité et l'environnement a été faite en utilisant plusieurs modèles de simulations développés et elle a démontré plusieurs gains. Ceci en plus du fait que cette intégration peut, également, représenter une bonne option pour le problème de pénurie de main-d'œuvre dans ce secteur.

Li et al. (2019) ont étudié le cas du transport entièrement autonome des palettes dans une usine intelligente, avec un robot mobile intelligent utilisant une architecture « Master/Slave ». Il s'agit d'un système qui se compose de deux robots indépendants, un jouant le rôle du maître (Master), et un autre jouant le rôle de l'esclave (Slave). Ces deux robots fonctionnent d'une manière similaire aux deux fourchettes d'un chariot élévateur, sans que le robot esclave ait une connexion mécanique ou physique avec le robot maître. Afin d'assurer l'accès libre sous les palettes, une unité d'entraînement compacte a été conçue et utilisée. Le robot mobile est donc plus compact, évolutif et plus sécuritaire, ce qui le rend très pratique pour une usine avec espace de travail restreint. La sécurité est assurée à travers des modules de sécurité et des capteurs installés sur chacun des robots.

Meysami et al. (2022) ont examiné l'impact de la représentation du modèle de l'environnement sur la performance d'un VAG. Ils ont défini, ainsi, une fonction de coût multiobjectives (pour un « perfect circular robot »), qui prend en considération la longueur et la complexité du chemin à parcourir et la distance minimale par rapport aux obstacles. Trois types de représentation, à savoir le quadrilatère, le triangle irrégulier et le triangle irrégulier de taille variable, ont été utilisés pour modéliser l'environnement tout en appliquant une couche d'inflation à la vue discrétisée. Les résultats de test des scénarios par différentes méthodes de décomposition cellulaire et une taille de couche d'inflation ont démontré qu'un maillage triangulaire de taille grossière presque constante est très convenable pour un robot de taille fixe dans un environnement non changeant. D'autre part, les tests ont démontré que la taille variable des représentations de mailles triangulaires et de cellules de grille peut représenter le meilleur choix pour les usines avec des aménagements changeants utilisant différentes tailles de robots, en raison de l'effet de la couche d'inflation. En termes de sécurité et de performance (longueur, temps de calcul, etc.), utiliser un niveau de maillage triangulaire irrégulier reste

une bonne stratégie pour différents types d'environnements et niveaux de complexité (multiobstacles, de type corridor, etc.). Ceci permet aussi de trouver un compromis entre la longueur du chemin parcouru par le VAG et sa complexité et la distance minimale par rapport aux obstacles rencontrés en naviguant vers la destination.

D'autre part, la télédétection par laser ou light detection and ranging (LiDAR), qui est une technologie de détection et d'estimation de la distance, peut représenter un moyen efficace pour faire face à la complexité de l'environnement. En effet, des conditions optimales de travail comme de la luminosité constante, des routes pavées et des conditions météorologiques optimales ou non exigeantes peuvent ne pas être évidentes dépendamment du secteur d'activité (exemple du secteur agricole). Reger et al. (2022) ont étudié l'applicabilité de cette technologie dans un environnement aussi irrégulier comme celui de l'agriculture. Le LiDAR permet non seulement de jouer un rôle dans la navigation, mais aussi d'éviter les obstacles et les collisions, et par conséquent de garder un haut niveau de sécurité. Il joue le rôle de guide pour les systèmes de transports sans conducteurs, comme les VAG. Des résultats prometteurs pour les conditions de travail complexes ont été déduits malgré un défi au niveau de l'exactitude, de la cohérence et de la précision. Cependant, l'usage à l'intérieur des locaux semble être beaucoup plus convenable pour assurer un bon niveau de protection contre les collisions.

Puppim de Oliveira et al. (2019) ont effectué une analyse qualitative et quantitative des différentes configurations de capteurs utilisés en industrie et ont présenté une manière systématique d'enquêter sur le degré de précision de la caméra comme étant un capteur de position pour un VAG et le problème de suivi de la trajectoire. L'objectif, étant de garantir une grande efficacité énergétique et une durée et une distance, optimales tout en assurant un niveau élevé de sécurité pour les personnes se trouvant dans la zone de travail du VAG.

Zamora-Cadenas et al. (2021) ont présenté un nouveau système de sécurité pour les VAG. Ce système permet d'arrêter tout mouvement du véhicule une fois l'obstacle est détecté sur son chemin. Il utilise la technologie à bande ultra large. Cette technologie se distingue, par rapport aux autres systèmes de localisation en temps réel, par le fait qu'elle ne nécessite aucune installation de matériels sur l'infrastructure de l'usine. En effet, des capteurs installés sur le véhicule font ce rôle en détectant et localisant les objets ou les personnes. Ceci simplifie l'usage des VAG, surtout dans des environnements dynamiques. Le résultat du déploiement de ce système dans un environnement réel a démontré de bonnes performances quant à la précision du système, ce qui a entraîné une erreur de positionnement répartie de manière plus uniforme autour d'un obstacle.

Czubenko and Kowalczuk (2021) ont proposé une solution au problème de détection de collisions de cobots à l'aide d'un capteur de force virtuel basé sur des réseaux de neurones. Dans le cadre de la numérisation, l'objectif d'implantation des cellules robotisées est de contribuer à l'élimination de la présence humaine dans les zones de production. Les cobots ont été conçus pour reconstituer des opérations humaines, telles que tirer, pousser, presser et soulever. Ils ont été conçus avec des caractéristiques qui les rendent dangereux pour les humains puisqu'ils se servent d'une grande force et fonctionnent à grande vitesse. Par la suite, en intégrant les cobots dans le même milieu de travail pour collaborer avec l'humain, il est devenu primordial de les rendre plus sécuritaires en mode collaboratif. Les cobots sont sujets à des restrictions pour les rendre plus sécuritaires pour les personnes (une capacité de charge inférieure, une vitesse réduite et une force d'impact réduite).

Malgré les restrictions, le risque de collision est toujours présent. Pour réduire ce risque, les cobots sont munis d'une spécification technique garantissant la réduction de sa vitesse dans le cas de détection d'un intrus dans la zone de travail et la supervision de l'intersection de sa trajectoire avec celle de l'humain. Cependant, les méthodes alternatives de détection d'une menace pour l'humain sont généralement assez coûteuses. Selon les auteurs, afin d'interagir librement avec les travailleurs et les Cobots doivent répondre à un certain nombre de normes de sécurité, spécialement les normes ISO 10218 et ISO/TS 15066.

Ayoubi et al. (2019) ont développé un nouveau dispositif appelé V2SOM (Variable Stiffness Safety-Oriented Mechanism) afin de sécuriser l'interaction physique humain-cobot. La présence d'un cobot avec l'humain dans le même lieu de travail représente des risques. Les auteurs ont signalé un risque de collision durant l'interaction humain-cobot. Pour prévenir ce risque, les cobots doivent assurer un contrôle de force sécuritaire dans un scénario d'interaction physique dans des environnements inconnus. Dans cette perspective, le dispositif développé par Ayoubi et al. (2019) s'est basé sur deux critères de sécurité, soient la force d'impact et les blessures à la tête, qui ont été considérés pour les évaluations de la performance des cobots. De plus, un mode de fonctionnement à faible rigidité a été proposé pour absorber, en toute sécurité, tout choc potentiel avec un humain. Bien que l'utilisation des cobots apparaisse comme une solution efficace pour améliorer l'exécution des tâches, certaines tâches ne sont pas facilement automatisables et nécessitent donc une intervention humaine.

Dans la même perspective, Ayoubi et al. (2020) ont proposé une simulation ainsi que des évaluations expérimentales de leur dispositif proposé pour améliorer la sécurité dans les conditions de travail normales, ainsi qu'en cas de collisions incontrôlées entre robot et humains. Les auteurs ont réalisé une étude expérimentale sur des sujets humains afin de traiter le problème de la sécurité des travailleurs face aux hautes capacités dynamiques du robot. Lors du fonctionnement en collaboration entre l'humain et le robot, ce dernier peut engendrer de graves dommages à l'humain en cas de collision. Pour éviter ce problème, les cobots doivent avoir des performances dynamiques semblables à celles humaines. Une fois qu'une collision humain-robot se produit, un passage spontané et en douceur vers le mode à faible rigidité est déclenché passivement pour absorber l'impact en toute sécurité.

Mohammadi Amin et al. (2020) ont proposé une solution pour améliorer la sécurité des cobots, en combinant la reconnaissance des gestes humains à l'aide de la perception visuelle et en même temps l'interprétation du contact physique humain-cobot par la perception tactile. Bien que le cobot soit programmé pour tenir compte de la sécurité humaine, le risque de collisions est toujours présent d'où la nécessité d'utiliser de nouvelles méthodes de détection de ces collisions (observateurs d'état étendus, analyse vibratoire, contrôleurs de perturbations à temps fini, contrôleurs d'énergie, etc.). En effet, le cobot n'est pas conscient de la position et de l'intention humaine, ce qui suscite des inquiétudes quant à la sécurité. De plus, lorsqu'une tâche collaborative est exécutée, le cobot ne peut pas distinguer si un humain est entré en contact avec lui accidentellement ou intentionnellement. Afin de faire face à ces problèmes, il est évident de concevoir un système fiable de surveillance de la sécurité, ainsi que de mettre en œuvre un système de sécurité multiobjectif qui reconnaît principalement les actions humaines et détecte le contact humain-cobot pour comprendre l'intention du travailleur afin d'éviter les collisions. Contrairement à (Ayoubi et al., 2019) qui ont souligné l'importance de la

présence de l'humain, Mohammadi Amin et al. (2020) considèrent que la présence de travailleurs dans un espace de travail partagé avec des cobots diminue en toute évidence la productivité.

Aliev and Antonelli (2021) soulignent que la collaboration entre l'humain et le cobot peut engendrer des risques. L'objectif de cette recherche était de développer un cadre utilisant des technologies de l'Industrie 4.0 qui permettent d'améliorer la fiabilité et la sécurité dans les applications de collaboration humain-cobot. En matière de SST, il existe des normes industrielles relatives à la collaboration humain-cobot imposant des exigences de sécurité strictes pour protéger les opérateurs humains du danger. Lorsqu'un cobot est équipé d'outils dangereux, se déplaçant à grande vitesse ou transportant de grandes charges, les normes en vigueur en matière de sécurité exigent la surveillance continue de la vitesse du cobot et le maintien d'une distance de séparation appropriée par rapport aux travailleurs.

Selon Andersson et al. (2021), la mise en œuvre d'un cobot dans l'industrie présente un ensemble de défis. Ceci en plus des problèmes techniques qui peuvent accompagner la mise en œuvre du processus d'intégration. En matière de SST, le défi est que la sécurité ne soit pas évaluée dans la phase de pré-étude ni dans la phase de conception de l'application. En effet, le fabricant doit adapter l'utilisation du cobot dans les différentes étapes d'un projet pour assurer la sécurité. Ils doivent aussi respecter les restrictions des normes de sécurité, telles que l'absence de risques de contact avec l'humain au niveau de la tête. De plus, ils doivent s'assurer que les documents de sécurité internes et les évaluations soient à jour en permanence. D'autre part, les auteurs ont souligné l'importance d'impliquer les opérateurs dans les premières phases de la mise en œuvre de la robotique collaborative pour gagner leur confiance et pouvoir gérer les perturbations quant à une nouvelle application de la cobotique dans les lieux de travail. Les auteurs ont ainsi proposé un système de surveillance qui permet de prédire les défaillances et d'évaluer des facteurs de fiabilité en utilisant l'apprentissage automatique (ou machine learning).

Scibilia et al. (2021) ont évalué le degré de répétabilité des procédures de test reliée à la cobotique et ont identifié les conditions qui peuvent conduire à des résultats non fiables, dans le but de minimiser les sources d'erreur. En matière de SST, l'interaction humain-cobot favorise le risque de collisions qui à son tour génère un risque de stress biomécanique chez les travailleurs. Dans ce cas, l'intégration d'un modèle d'interaction dans les règles de sécurité, qui s'exécute dans le but de contrôler le robot, est nécessaire. Il existe des mesures de sécurité, décrites par des normes (comme la norme ISO/TS 15066), pour sécuriser les modalités d'interaction telles que l'arrêt surveillé de sécurité des robots, le guidage manuel pour transmettre les commandes de mouvement au système de robot, la surveillance de la vitesse et de la distance de séparation et la limitation de puissance et de force de robot. Malgré ces efforts, l'identification des exigences de sécurité dans un domaine d'application spécifique est difficile, car ces normes ne décrivent pas de manière exhaustive les exigences des applications de la robotique collaborative. Par conséquent, les utilisateurs auront des incertitudes quant à l'application des directives et des normes dans leur domaine spécifique. De plus, les auteurs ont signalé le manque de procédures d'essais pratiques à exécuter pour évaluer le respect des exigences dans un système collaboratif. Pour faire face à ces problèmes, des mesures de protection techniques actives dans les cobots (protections tactiles, capteurs de couples, capteurs de forces, imitateurs de vitesses et de portées, etc.), ainsi que des mesures

de protection passives (adaptation de la forme du cobot, de sa pince, de l'outil, de la pièce à usiner et de tous les autres dispositifs impliqués dans le processus de travail, appliquer des matériaux de protection sur une ou plusieurs parties du cobot (peaux), assurer la conformité passive au stade de la conception) sont nécessaires. D'autre part et afin de prévenir le risque de collisions, une mesure de la charge résultante des processus critiques de collisions doit être fournie afin d'évaluer et de valider la réduction de ces risques. Les procédures de test doivent être répétées par les utilisateurs chaque fois qu'il y a des changements dans les conditions d'application des cobots.

Pang et al. (2018) ont proposé une stratégie d'interaction sûre et naturelle entre l'humain et le cobot. Pour ce faire, les auteurs ont décidé de couvrir le cobot par une peau tactile semblable à celle de l'humain. Cette solution a pour but de diminuer l'impact des collisions à la suite des interactions humain-cobot. En effet, le contact rigide avec un impact sévère entre le robot et l'humain ne peut pas satisfaire aux exigences de sécurité. Pour réduire le risque de blessures, le cobot doit percevoir une collision à temps. En d'autres termes, la peau du robot proposée doit être capable de détecter une variation significative de la force de contact. Selon les auteurs, le niveau d'interaction humain-cobot peut être amélioré en incorporant des fonctions de détection multiples et en construisant des mécanismes d'évaluation de la sécurité à plusieurs niveaux.

Geiger and Waldschmidt (2019), ont proposé une solution pour prévenir le risque de collision. En matière de sécurité, le défi pour les cobots est la conformité aux exigences de sécurité pour protéger les travailleurs des blessures. Dans cette recherche, les auteurs ont présenté un système de sécurité, basé sur un capteur de proximité avec des antennes, qui doit éviter la collision avec l'humain et arrêter le cobot si la collision est inévitable. Afin d'avoir de meilleurs résultats, il est nécessaire de disposer d'un grand nombre de capteurs à proximité et autour du cobot (de plusieurs centimètres à quelques mètres).

Sandoval Arévalo et al. (2019) ont présenté une étude d'un dispositif de rigidité variable des articulations pour une mise en œuvre dans les articulations d'un cobot multi-DoF. En matière de sécurité, les efforts appliqués par le manipulateur sur le patient doivent être régulés pour assurer sa sécurité. Dans cette perspective, les auteurs ont recommandé l'utilisation des actionneurs à rigidité variable pour améliorer les caractéristiques de sécurité des robots qui partagent un espace de travail commun avec les humains.

L'utilisation des bras de robots industriels dans les applications d'interaction humain-machine doit satisfaire aux exigences de sécurité, dont ces derniers doivent se conformer aux exigences de sécurité de la norme ISO 15066. Dans cette perspective Yen et al. (2019) ont proposé une conception de bras de cobot rigide qui utilise un capteur de force virtuel et un contrôle de la rigidité pour permettre la détection des collisions en toute sécurité. En effet, la détection des collisions est un élément de sécurité essentiel pour les bras de cobots. Pour ce faire, il est recommandé d'intégrer l'aspect sécuritaire dès la phase de conception. Dans ce cadre, la conception des bras de cobots intègre souvent des mécanismes flexibles et des capteurs de forces pour détecter et absorber les forces d'impact externes. Elle comprend souvent des dispositifs de sécurité (actionneurs élastiques et mécanismes flexibles) pour réduire les dommages subis lors d'une collision inattendue.

Les cobots commerciaux, en particulier, adoptent la technique de détection des collisions et déploient un arrêt de protection après une collision humain-cobot. Dans ce cadre, Shin et al. (2019) ont proposé une approche de capteurs virtuels qui calcule la force et la pression de pointe de collision attendues qui

résulteraient d'une interaction humain-cobot à un moment donné, en utilisant un modèle de contacts analytiques. En prédisant la pression et la force de collision avant son occurrence, la méthode proposée guide le cobot dans la gestion de sa tâche tout en respectant le seuil de sécurité de collision. En effet, l'ajout de la pression comme nouveau paramètre de sécurité implique la nécessité de prendre en compte la surface de contact dans les évaluations de la sécurité des collisions. La sécurité du cobot en matière de collision pourrait être examinée en effectuant des tests de collisions dans de différents scénarios indésirables. D'autre part, le capteur de collisions virtuel proposé peut être utilisé conjointement avec le système de commandes non seulement pour empêcher l'humain de s'approcher du cobot, mais aussi pour empêcher le cobot de se déplacer pour entrer en collision avec l'humain sans réduire sa vitesse.

Afin de garantir la sécurité des humains en interaction avec ces cobots, Engelbrecht et al. (2021) ont développé un algorithme de mouvement pour un système multirobot capable d'éviter les obstacles tout en maintenant la stabilité du mouvement. En effet, une méthode de planification de trajectoire autoadaptative peut être introduite pour améliorer les capacités de planification de trajectoire du système multirobot afin de prévenir le risque de collisions avec des obstacles dans la trajectoire.

Les techniques de contrôle de l'évitement des collisions sont essentielles pour améliorer la sécurité des travailleurs. Dans cette perspective, Chiriatti et al. (2021) ont présenté des algorithmes d'évitement de collisions pour les obstacles mobiles. Par la suite, ces algorithmes ont été vérifiés par simulation. Les auteurs ont mentionné que la robotique collaborative implique des techniques de contrôle d'évitement des collisions pour des environnements dynamiques. En effet, les cobots sont équipés d'ensembles de capteurs capables de percevoir le mouvement humain et de détecter la position d'objets à l'intérieur de l'espace de travail pouvant générer un risque de collisions avec les travailleurs.

Badia et al. (2022) ont passé en revue les travaux actuels, mettant en évidence les problèmes et les défis existants et ils ont proposé de nouvelles approches en utilisant la réalité virtuelle (RV) et, plus généralement, la réalité étendue (RE), comme outil pour tester en toute sécurité la robotique collaborative. Bien que le remplacement des humains par des cobots dans des tâches à risque soit une solution pertinente, il est essentiel de ne pas négliger les nouveaux risques physiques ou psychologiques qui peuvent être engendrés par la présence d'un cobot dans un milieu de travail. En effet, les différentes conceptions de cobots peuvent avoir un impact sur la façon dont les humains les perçoivent et comment cette perception a un impact sur la collaboration manuelle. D'autre part, la compréhension mutuelle des actions de l'autre et l'acceptabilité des actions robotiques pour un humain est une question importante dans le domaine de l'interaction humain-cobot. De plus, la collaboration entre les humains et les cobots est durement limitée par les aspects de la sécurité et du confort des travailleurs.

3.3.2 Risques de stabilité physique et solutions proposées

La stabilité est un élément ayant un impact important sur les aspects de sécurité d'un VAG. Dans des conditions de centroïde variable, la stabilité d'un VAG devient un défi. Les VAG à direction indépendante des roues et à l'entraînement indépendant des quatre roues ont été le sujet principal de l'étude faite par Q. Zhang et al. (2022) traitant les problèmes de stabilité et de sécurité dus principalement à un défaut ou un manque d'efficacité de l'actuateur d'entraînement. Des modèles ont été

développés pour ensuite concevoir un contrôleur optimal en tenant compte des conditions de variabilité de centroïde. La simulation des modèles développés a démontré des résultats très proches de l'objectif théorique prévu.

De leur côté, Liu et al. (2018) ont traité le cas des véhicules autonomes de surface à grande vitesse qui représentent des VAG de plus en plus utilisés au sol dans plusieurs environnements industriels et miniers. Ainsi, ils ont présenté un modèle de contrôle prédictif de la stabilisation des VAG. Ce modèle tient compte de la topographie du sol, principalement, de sa courbure et de l'angle d'inclinaison. Des contraintes de conduite sécuritaire comme le « *zero-tilting moment point* », le « *zero moment point* » et le « *lateral safety corridor* » sont prises en compte pour s'assurer de la stabilité et éviter les collisions avec des obstacles fixes ou mobiles.

3.3.3 Risques de gestion des données et solutions proposées

La place qu'occupent les données dans l'Industrie 4.0 est cruciale. La gestion des données en temps réel, la collecte et l'analyse des données en masse, la sécurité des données et la connexion et l'interconnexion sécuritaire des cobots et des VAG, entre autres, restent un énorme casse-tête. Il est, ainsi, très important que la collecte et l'utilisation des données soient en toute sécurité et que le fonctionnement des VAG ainsi que les cobots soient sécuritaires pour les travailleurs avec qui ils partagent la même zone de travail. Le défi en termes de cybersécurité est, ainsi, un défi de taille (Ben Aziza et al., 2020). Tsung et al. (2022) ont proposé une solution pour réduire le délai de traitement des données brutes reçus des VAG en utilisant l'infonuagique. Le délai peut avoir un impact de sécurité, vu qu'un problème détecté et non réglé en temps réel peut engendrer des accidents de travail. Ces accidents peuvent être majeurs dans le cas d'un trafic de plusieurs VAG. La plateforme de télédétection proposée doit être installée directement sur les bords du VAG et consiste à un système de surveillance en périphérie (Tsung et al., 2022). Ce système a démontré un haut niveau de cohérence et de performance lors de son expérimentation et a permis de gagner en temps et en coût de communication.

Dans toute opération particulière impliquant une interaction humain-cobot, un niveau minimal de sécurité en temps réel doit être garanti. Islam et al. (2019) ont présenté une approche basée sur l'ontologie pour résoudre des scénarios industriels pour des applications de sécurité dans les systèmes de production cyberphysiques. En effet, des capteurs de force, des capteurs de couples et des caméras visuelles/infrarouges (IR) sont utilisés pour la détection des collisions.

La détection des collisions en temps réel est importante pour une planification des parcours sans collision. Chan and Tsai (2020) ont proposé une stratégie en temps réel pour modifier la vitesse sans collision en utilisant la modélisation ellipsoïde pour assurer un niveau minimal de sécurité, en validant son efficacité par des simulations et des expériences. Un indice de danger avec des ellipsoïdes est utilisé pour mesurer quantitativement le degré de sécurité afin de détecter rapidement les collisions. Donc si la collision est prévue, le cobot ralentit ou attend pour réduire la probabilité de blessures.

Gradolewski et al. (2020) ont essayé de trouver une solution fiable, rentable et en temps réel à intégrer au système de sécurité d'un cobot afin de détecter, d'identifier et de localiser les humains qui s'approchent de la zone opérationnelle, et de fournir des informations appropriées au système de contrôle du cobot. En effet, l'un des défis du développement d'un système de sécurité hautement fiable est l'exigence d'une performance en temps réel dans un environnement changeant sans

compromettre la productivité des cobots. Pour garantir une coopération sûre entre les humains et les robots, il est généralement nécessaire de détecter les humains, d'estimer leur position et d'éviter les obstacles. Selon (Gradolewski et al., 2020), un temps de réaction court, la fiabilité et, la grande capacité de détection et d'identification sont des exigences cruciales pour un système de sécurité approprié pour les cobots.

3.3.4 Risques ergonomiques et solutions proposées

Behrens et al. (2021) ont présenté une étude sur les interactions biomécaniques entre les humains et les cobots. Le recours aux cobots à un bénéfice économique, dont le gain en investissement sur des capteurs ou des clôtures de sécurité coûteuses et encombrantes. Bien que les cobots offrent un large éventail d'opportunités pour améliorer l'ergonomie et l'efficacité des postes de travail manuel, les interactions humain-cobot peuvent générer des risques de blessures musculosquelettiques (TMS). Colim et al. (2020) se sont intéressés aux risques de TMS liés au travail. Dans leur recherche, les auteurs ont proposé un cadre pour guider les praticiens de l'ergonomie à travers toutes les étapes de l'évaluation et de la conception des postes de travail. En effet, l'intervention ergonomique est la meilleure stratégie pour prévenir les TMS liés au travail. D'autre part, la fabrication collaborative humain-cobot a été proposée comme une solution potentielle pour améliorer les conditions de travail. Selon les auteurs, un cadre de collaboration puissant a un impact positif sur la productivité, la flexibilité et, surtout, un effet net positif sur la création de nouveaux emplois plutôt que sur le remplacement des travailleurs. En effet, les robots aident ou prennent en charge les tâches physiques les plus exigeantes. Elles réduisent les problèmes ergonomiques qui découlent du stress physique et cognitif au travail, et améliorent la sécurité, la qualité et la productivité du lieu de travail.

Vitolo et al. (2022) ont proposé une conception préliminaire d'une interface mécatronique qui pourrait permettre l'intégration de différents cobots et manipulateurs mobiles. La robotisation dans le milieu de travail empêche les travailleurs humains de réaliser des tâches répétitives et non ergonomiques à l'intérieur des usines de fabrication. Cependant, il existe un manque de normes et de lignes directrices qui permettent l'évaluation des nouveaux risques ergonomiques liés à l'intégration des cobots et des manipulateurs mobiles. En effet, l'intégration de ces deux systèmes (cobots et manipulateurs mobiles) augmente le risque du contact accidentel, à la fois, lorsque le robot mobile est en mouvement et lorsqu'il ne l'est pas. Au niveau de la sécurité, les cobots sont équipés d'un ensemble de capteurs pour détecter l'espace environnant et la présence humaine. Ils disposent aussi de capteurs de couple et de force pour détecter les contacts indésirables pour réduire les dommages potentiels aux humains. En revanche, il existe un manque de réglementation de sécurité pour les manipulateurs mobiles. Afin d'améliorer l'aspect sécuritaire, il faut prendre en compte dès le début les situations dangereuses particulières qui peuvent survenir dans les applications robotiques industrielles avec des manipulateurs mobiles. De plus, les ingénieurs doivent adopter des mesures complémentaires en fonction du scénario spécifique dans lequel le système fonctionne.

3.4 Risques psychosociaux et solutions proposées

La collaboration robotique est basée sur l'interaction humain-cobot en partageant le même espace de travail. À la suite de cette interaction, si l'opérateur ne fait pas suffisamment confiance à son coéquipier cobotique, il est susceptible de consacrer davantage de ressources mentales pour s'assurer que le cobot effectue les bonnes actions, ce qui augmente sa charge mentale.

Afin de réduire les risques psychologiques (stress, anxiété, etc.), le cobot doit disposer d'une séparation physique, tel qu'une distance de sécurité. Dans cette perspective Liu et al. (2022) ont proposé un modèle de champ de sécurité psychologique (PSF). Ce modèle est basé sur une expérience complète sur différentes vitesses et distances minimales lors de l'approche de la tête, de la poitrine et de l'abdomen, afin d'obtenir l'équation de surface ordinaire du stress psychologique en fonction de la vitesse et de la distance minimale en utilisant l'ajustement de données. À l'aide de ce modèle, les chercheurs ont réussi à calculer la distance spécifique de séparation dont laquelle le cobot doit s'arrêter sans causer de risques psychologiques aux travailleurs. Malgré ces calculs et ces mesures de précautions, les risques psychologiques demeurent.

Dans le contexte d'utilisation de la robotique collaborative, une analyse des risques psychologiques est généralement nécessaire pour identifier les dangers possibles, estimer les risques en SST et identifier des stratégies appropriées d'atténuation de ces risques. Pantano et al. (2022) ont présenté une méthodologie et un nouvel outil d'analyse des risques qui a été développé pour soutenir la gestion du changement à la suite de l'introduction des cobots dans le contexte d'usine connectée. Un tel changement demeure complexe, puisqu'il implique plusieurs paramètres contrôlables et non contrôlables à savoir l'acceptation des travailleurs de cohabiter avec des cobots.

Les facteurs psychosociaux doivent être pris en compte pour faire face aux risques émergents dans une analyse globale de l'intégration des nouvelles technologies dans l'entreprise. Pour faciliter l'introduction des cobots et surmonter le souci de trouver un équilibre entre la sécurité des travailleurs et la nécessité d'éviter de perturber le travail du cobot, il faut impliquer les travailleurs depuis la conception jusqu'à l'intégration et l'utilisation. En effet, la participation accrue des travailleurs, leur sensibilisation et leur formation ont un effet positif sur leur bien-être et sur l'acceptation de travailler à proximité des cobots (Berx et al., 2022).

4 DISCUSSION DES RÉSULTATS

Le contexte industriel actuel vit plusieurs changements qui sont dus, non seulement à l'évolution du besoin du marché, mais surtout à l'intégration de plus en plus de technologies dans le processus de fabrication. L'objectif principal étant de générer plus de profits en augmentant la productivité, en améliorant la qualité et en diversifiant les produits. Ainsi, les clients, de plus en plus exigeants, cherchent plus de personnalisation, ce qui fait que la production de masse ne réponde plus à ce besoin. Il est, dans cette époque industrielle, important de diversifier et d'augmenter la capacité d'adaptation, la réactivité et la rapidité de changement. La capacité humaine, en ce sens, est limitée et ne permette pas de répondre à ce besoin. Pour cette raison, il était plus que nécessaire de trouver des solutions plus efficaces pour atteindre ces objectifs. Dans le cadre de l'Industrie 4.0, plusieurs technologies ont participé à la quête d'évolution et au changement du contexte de travail vers un contexte moderne, mais aussi où la place de l'humain est à redéfinir.

Les VAG ainsi que les Cobots représentent une des façades de la nouvelle ère industrielle. En effet, ces deux technologies permettent d'automatiser deux parmi les activités industrielles les plus pénibles (manutentions et tâches répétitives). Les VAG permettent un transport rapide et précis sans la participation des travailleurs. Les cobots, de leurs côtés, sont capables de remplacer les travailleurs dans des tâches répétitives, difficiles ou à risque, et de collaborer avec eux pour rendre d'autres tâches plus efficaces et moins exigeantes. Néanmoins, le partage du milieu de travail avec des équipements autonomes pouvant se

déplacer plus ou moins librement avec des humains ne peut pas être sans risques. Les risques de collisions représentent ceux les plus importants, selon la littérature, en raison de leur évidence, mais surtout de la gravité de leurs conséquences en SST. Toutefois, plusieurs autres types de risques découlent de cette intégration (Figure 2).

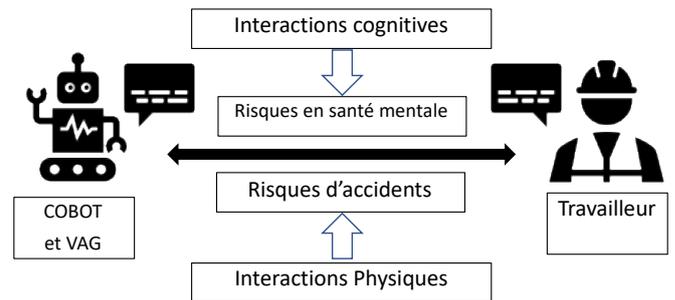


Figure 2. Défis en sécurité, en santé mentale et psychique reliés à l'intégration des Cobots et VAG

Trouver un équilibre idéal dans l'interaction entre les nouvelles technologies autonomes et les travailleurs dans un environnement commun présente plusieurs défis. Afin d'améliorer l'aspect sécuritaire, des règles de sécurité dans les lieux de travail robotisés ont été définies dans le but d'éliminer les risques en concevant des équipements appropriés, en appliquant des équipements de sécurité (par exemple, des boutons ou des capteurs de sécurité), en fournissant des marquages informatifs (par exemple, des panneaux d'avertissement), en éduquant et en formant les employés de production, les programmeurs et le personnel de service (formation et exercices pratiques) et en utilisant des équipements de protection individuels (Pang et al., 2018). Dans la même perspective, plusieurs chercheurs ont cité un ensemble de recommandations (Badri et al., 2018). Il est nécessaire de toujours effectuer une analyse approfondie des risques et une évaluation de la sécurité des lieux de travail. En effet, un réglage, une inspection ou une maintenance préventive et prédictive seront toujours nécessaires (Pauliková et al., 2021). Il faut aussi respecter les exigences ergonomiques lors de la conception des équipements et examiner attentivement la possibilité de remplacer complètement le travail humain ou de simplement le compléter (Jocelyn et al., 2017). Avant d'intégrer un équipement dans un milieu industriel, des mesures visant à réduire les risques en SST doivent faire partie du projet de poste de travail. Pour chaque secteur industriel, une analyse globale ayant pour but d'identifier les risques et les activités dangereuses des technologies autonomes doit être effectuée (Pauliková et al., 2021).

Dans ce travail, qui représente une première étape dans le cadre d'un projet plus large, nous avons présenté une revue bibliographique dans le but d'avoir une idée sur l'intérêt des chercheurs à la problématique de SST reliée aux VAG et des cobots dans le milieu de travail, et surtout dans le secteur industriel. Les résultats de cette revue nous a fait ressortir plusieurs conclusions parmi lesquelles :

- Les chercheurs se sont beaucoup plus intéressés au défi de sécurité que l'impact mental et psychologique du changement rapide et continu des milieux de travail. Un tel changement ne doit pas être pris à la légère quant à son effet sur l'humain qui, de nature, démontre une résistance à tout changement.
- La majorité des travaux de recherche explorés se focalisent sur des solutions fragmentées qui traitent des problématiques pointues et mettent moins d'efforts sur

la sécurité intrinsèque qui touche plus la conception des équipements autonomes. Le tout n'aidera pas à respecter le principe fondamental de l'élimination des dangers à la source.

- La cybersécurité, qui représente un défi majeur et universel, ne figure pas comme priorité dans les études concernant les VAG et cobots.
- Le sujet de la formation et de la qualification de la main-d'œuvre à la nouvelle réalité industrielle ne prend pas assez d'ampleur, en termes de recherche malgré son importance dans le contexte de transformation numérique. En effet, une main-d'œuvre qualifiée est primordiale à une telle transition à moindre risque. Des travailleurs bien formés et bien informés garantissent certainement un travail collaboratif beaucoup plus sécuritaire.

5 CONCLUSION

Les apports des VAG et des cobots en matière de productivité, d'autonomie et de qualité sont évidents. Les défis de SST liés à l'usage croissant des VAG et des cobots sont multiples. Le changement rapide et parfois radical des milieux de travail n'est pas nécessairement suivi par une adaptation des gestionnaires et des travailleurs à la nouvelle réalité.

La SST est encore sous-estimée et sous-étudiée et elle nécessite une analyse multidisciplinaire dans laquelle on étudie la conception, l'intégration et l'utilisation des nouvelles technologies autonomes dans sa globalité pour être beaucoup plus proche du contexte réel et résoudre des problèmes concrets et actuels. Ceci en effectuant, entre autres, des études expérimentales en impliquant des concepteurs et des utilisateurs des VAG et des cobots dans différents secteurs économiques.

6 REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le Comité scientifique du CIGI Qualita MOSIM 2023 de nous avoir donné l'opportunité de présenter ce travail.

Nous remercions aussi le Centre interordres de recherche et de transfert en manufacturier intelligent (CIRT-MI) du Centre national intégré du manufacturier intelligent (CNIMI) pour leur support financier.

7 RÉFÉRENCES

Aliiev, K., & Antonelli, D. (2021). Proposal of a monitoring system for collaborative robots to predict outages and to assess reliability factors exploiting machine learning. *Applied Sciences*, 11(4), 1621.

Andersson, S. K. L., Granlund, A., Bruch, J., & Hedelind, M. (2021). Experienced Challenges When Implementing Collaborative Robot Applications in Assembly Operations. *International Journal of Automation Technology*, 15(5), 678-688.

Ayoubi, Y., Laribi, M. A., Arsicault, M., & Zeghloul, S. (2020). Safe pHRI via the variable stiffness safety-oriented mechanism (V2SOM): Simulation and experimental validations. *Applied Sciences*, 10(11), 3810.

Ayoubi, Y., Laribi, M. A., Zeghloul, S., & Arsicault, M. (2019). V2SOM: A Novel Safety Mechanism Dedicated to a Cobot's Rotary Joints. *Robotics*, 8(1), 18.

Badia, S. B. i., Silva, P. A., Branco, D., Pinto, A., Carvalho, C.,

Menezes, P., Almeida, J., & Pilacinski, A. (2022). Virtual Reality for Safe Testing and Development in Collaborative Robotics: Challenges and Perspectives. *Electronics*, 11(11), 1726.

Badri, A., Boudreau-Trudel, B., & Souissi, A. S. (2018, 201811). Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? *Safety Science*, 109, 403-411.

Behrens, R., Pliske, G., Umbreit, M., Piatek, S., Walcher, F., & Elkmann, N. (2021). A statistical model to determine biomechanical limits for physically safe interactions with collaborative robots. *Frontiers in robotics and AI*, 8.

Ben Aziza, M. N., Badri, A., & Chihi, F. (2020). OHS-Related Risks in an Industry 4.0 Manufacturing Plant. In C. M. Hussain & P. Di Sia (Eds.), *Handbook of Smart Materials, Technologies, and Devices: Applications of Industry 4.0* (pp. 1-20). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58675-1_6-1

Berx, N., Adriaensen, A., Decré, W., & Pintelon, L. (2022). Assessing System-Wide Safety Readiness for Successful Human-Robot Collaboration Adoption. *Safety*, 8(3), 48.

Chan, C.-C., & Tsai, C.-C. (2020). Collision-free speed alteration strategy for human safety in human-robot coexistence environments. *IEEE Access*, 8, 80120-80133.

Chiriatti, G., Palmieri, G., Scoccia, C., Palpacelli, M. C., & Callegari, M. (2021). Adaptive obstacle avoidance for a class of collaborative robots. *Machines*, 9(6), 113.

Colim, A., Faria, C., Braga, A. C., Sousa, N., Rocha, L., Carneiro, P., Costa, N., & Arezes, P. (2020). Towards an ergonomic assessment framework for industrial assembly workstations—A case study. *Applied Sciences*, 10(9), 3048.

Czubenko, M., & Kowalczyk, Z. (2021). A Simple Neural Network for Collision Detection of Collaborative Robots. *Sensors*, 21(12), 4235.

Engelbrecht, D., Steyn, N., & Djouani, K. (2021). Adaptive Virtual Impedance Control of a Mobile Multi-Robot System. *Robotics*, 10(1), 19.

Geiger, M., & Waldschmidt, C. (2019). 160-GHz radar proximity sensor with distributed and flexible antennas for collaborative robots. *IEEE Access*, 7, 14977-14984.

Gradolewski, D., Maslowski, D., Dziak, D., Jachimczyk, B., Mundlamuri, S. T., Prakash, C. G., & Kulesza, W. J. (2020). A distributed computing real-time safety system of collaborative robot. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 26(2), 4-14.

Islam, S. O. B., Lughmani, W. A., Qureshi, W. S., Khalid, A., Mariscal, M. A., & Garcia-Herrero, S. (2019). Exploiting visual cues for safe and flexible cyber-physical production systems. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(12), 1687814019897228.

Jocelyn, S., Burret-Vienney, D., Giraud, L., & Sghaier, A. (2017). Robotique collaborative Évaluation des fonctions de

sécurité et retour d'expérience des travailleurs, utilisateurs et intégrateurs au Québec. IRSSST - Direction des communications et de la valorisation de la recherche.

- Li, G., Lin, R., Li, M., Sun, R., & Piao, S. (2019). A Master-Slave Separate Parallel Intelligent Mobile Robot Used for Autonomous Pallet Transportation. *Applied Sciences*, 9(3), 368. <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/3/368>
- Liu, B., Fu, W., Wang, W., Li, R., Gao, Z., Peng, L., & Du, H. (2022). Cobot Motion Planning Algorithm for Ensuring Human Safety Based on Behavioral Dynamics. *Sensors*, 22(12), 4376.
- Liu, K., Gong, J., Chen, S., Zhang, Y., & Chen, H. (2018). Model Predictive Stabilization Control of High-Speed Autonomous Ground Vehicles Considering the Effect of Road Topography. *Applied Sciences*, 8(5), 822. <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/5/822>
- Meysami, A., Cuillère, J. C., François, V., & Kelouwani, S. (2022). Investigating the Impact of Triangle and Quadrangle Mesh Representations on AGV Path Planning for Various Indoor Environments: With or without Inflation [Article]. *Robotics*, 11(2), Article 50. <https://doi.org/10.3390/robotics11020050>
- Mohammadi Amin, F., Rezayati, M., van de Venn, H. W., & Karimpour, H. (2020). A mixed-perception approach for safe human-robot collaboration in industrial automation. *Sensors*, 20(21), 6347.
- Pang, G., Deng, J., Wang, F., Zhang, J., Pang, Z., & Yang, G. (2018). Development of flexible robot skin for safe and natural human-robot collaboration. *Micromachines*, 9(11), 576.
- Pantano, M., Pavlovskiy, Y., Schulenburg, E., Traganos, K., Ahmadi, S., Regulin, D., Lee, D., & Saenz, J. (2022). Novel Approach using Risk Analysis Component to Continuously Update Collaborative Robotics Applications in the Smart, Connected Factory Model. *Applied Sciences*, 12(11), 5639.
- Park, S. H., Hwang, J., Yun, S., & Kim, S. (2022, 2022/01/30). Automatic Guided Vehicles Introduction Impacts to Roll-On/Roll-Off Terminals: Simulation and Cost Model Analysis. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 6062840. <https://doi.org/10.1155/2022/6062840>
- Pauliková, A., Gyurák Babel'ová, Z., & Ubárová, M. (2021). Analysis of the impact of human-cobot collaborative manufacturing implementation on the occupational health and safety and the quality requirements. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 1927.
- Puppim de Oliveira, D., Pereira Neves Dos Reis, W., & Morandin Junior, O. (2019). A Qualitative Analysis of a USB Camera for AGV Control. *Sensors* (Basel, Switzerland), 19(19). <https://doi.org/10.3390/s19194111>
- Reger, M., Stumpfenhausen, J., & Bernhardt, H. (2022). Evaluation of LiDAR for the Free Navigation in Agriculture [Article]. *AgriEngineering*, 4(2), 489-506. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4020033>
- Sandoval Arévalo, J. S., Laribi, M. A., Zegloul, S., & Arsicault, M. (2019). On the design of a safe human-friendly teleoperated system for doppler sonography. *Robotics*, 8(2), 29.
- Scibilia, A., Valori, M., Pedrocchi, N., Fassi, I., Herbster, S., Behrens, R., Saenz, J., Magisson, A., Bidard, C., & Kühnrich, M. (2021). Analysis of interlaboratory safety related tests in power and force limited collaborative robots. *IEEE Access*, 9, 80873-80882.
- Shin, H., Kim, S., Seo, K., & Rhim, S. (2019). A virtual pressure and force sensor for safety evaluation in collaboration robot application. *Sensors*, 19(19), 4328.
- Tsung, C.-K., Chang, F.-S., & Liu, X.-Y. (2022). On the Construction of an Edge-Based Remote Sensing Framework: The Applications on Automated Guided Vehicles and Drones. *Electronics*, 11(7), 1034. <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/7/1034>
- Valori, M., Scibilia, A., Fassi, I., Saenz, J., Behrens, R., Herbster, S., Bidard, C., Lucet, E., Magisson, A., & Schaake, L. (2021). Validating safety in human-robot collaboration: Standards and new perspectives. *Robotics*, 10(2), 65.
- Vitolo, F., Rega, A., Di Marino, C., Pasquariello, A., Zanella, A., & Patalano, S. (2022). Mobile Robots and Cobots Integration: A Preliminary Design of a Mechatronic Interface by Using MBSE Approach. *Applied Sciences*, 12(1), 419.
- Yang, K., Xia, X., Zhang, F., Ma, H., Sang, S., Zhang, Q., & Ji, J. (2022). Implementation of a Sponge-Based Flexible Electronic Skin for Safe Human-Robot Interaction. *Micromachines*, 13(8), 1344.
- Yen, S.-H., Tang, P.-C., Lin, Y.-C., & Lin, C.-Y. (2019). Development of a virtual force sensor for a low-cost collaborative robot and applications to safety control. *Sensors*, 19(11), 2603.
- Zamora-Cadenas, L., Velez, I., & Sierra-Garcia, J. E. (2021). UWB-Based Safety System for Autonomous Guided Vehicles Without Hardware on the Infrastructure. *IEEE Access*, 9, 96430-96443. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3094279>
- Zhang, M., Abbas-Turki, A., Mualla, Y., Koukam, A., & Tu, X. (2022). Coordination between Connected Automated Vehicles and Pedestrians to Improve Traffic Safety and Efficiency at Industrial Sites [Article]. *IEEE Access*, 10, 68029-68041. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3185734>
- Zhang, Q., Liu, W., & Liu, P. (2022). Fault-Tolerant Control of Automated Guided Vehicle Under Centroid Variation [Article]. *IEEE Access*, 10, 68995-69009. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3187031>