

Robotique collaborative : enjeux de santé et de sécurité au travail

AUTEURS :

A. Savescu^{1,2}, D. Tihay²,

1. Département Homme au travail, INRS

2. Département Ingénierie des équipements du travail, INRS

EN RÉSUMÉ

La prévention des troubles musculo-squelettiques (TMS) est un enjeu majeur en santé au travail. Certaines entreprises s'orientent vers « la robotique collaborative » pour réduire les facteurs de risque biomécaniques. Cet article présente les enjeux, définitions et contexte normatif de la robotique collaborative et interroge son impact en prévention. Ainsi, il montre la complexité des nouvelles formes de travail induites et la nécessité de la prise en compte de celle-ci pour un meilleur déploiement en situation réelle. Les industriels sont ainsi amenés à réfléchir sur leur besoin de mise en place d'une situation de travail impliquant la robotique collaborative, mais également sur les limites de ces technologies. Cet article pose également des prémices de discussion pour lesquelles la recherche doit investir.

MOTS CLÉS

TMS / Trouble musculo-squelettique / Pathologie articulaire / Technologie avancée / Ergonomie / Organisation du travail / Risque psychosocial / RPS



© VINCENT NGUYEN POUR L'INRS

Il est maintenant unanimement admis que l'activité de travail peut participer à la survenue, au maintien ou à l'aggravation des troubles musculo-squelettiques (TMS). Ces troubles regroupent un ensemble d'atteintes de l'appareil locomoteur, notamment du membre supérieur (syndrome du canal carpien, épicondylite, myalgie, tendinopathie de la coiffe de rotateurs...) ou du dos (lombalgies) [1]. Elles se manifestent par des douleurs qui peuvent évoluer vers une perte de fonctionnalité sensori-motrice et devenir très invalidantes. Tous les secteurs d'activité sont concernés

par les TMS et leur sinistralité est importante, autant en France qu'en Europe [2].

Face à ce phénomène et compte tenu du coût humain, social et économique des TMS, leur prévention représente un enjeu majeur en santé au travail. Ainsi, en France, la prévention des TMS demeure prioritaire et est incluse dans des actions telles que la prévention de l'usure professionnelle et de la désinsertion professionnelle et le maintien dans l'emploi. De même, la prévention des TMS figure parmi les priorités de recherche en Europe avec, notamment, une volonté de mener des recherches multidimension-

nelles incluant des approches techniques, organisationnelles et centrées sur l'humain [3]. Ces actions sont soutenues par une volonté de relance et de développement de l'économie manufacturière [4] et par des développements technologiques majeurs [5]. Ainsi, dans une perspective de réduction des facteurs biomécaniques en lien avec la survenue des TMS, certaines entreprises s'orientent vers « la robotique collaborative ». Ce sujet est de plus en plus évoqué par les entreprises et dans la littérature grand public. Les perspectives de croissance annuelle moyenne attendues sur le marché des « cobots » en France jusqu'en 2024 sont de 6 % [6]. Toutefois, de tels développements ne sont pas sans poser de nouveaux défis en termes de santé et sécurité au travail [7] pour lesquels la recherche doit investir [8].

L'objectif de cet article est de faire un tour d'horizon des enjeux, définitions et contexte normatif de la robotique collaborative et de s'interroger, de façon plus spécifique, sur l'impact de ces nouvelles formes de travail sur la prévention des TMS et des risques mécaniques.

ROBOTIQUE COLLABORATIVE : DÉFINITIONS ET CONTEXTE NORMATIF

Une enquête menée par l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) estime que seulement 9 % des emplois pourraient être automatisés [9]. *A contrario*, d'autres études, basées sur l'analyse de plus de 700 métiers aux États-Unis, estiment que 47 % des emplois seraient automatisables [10]. Cette tendance pourrait également être semblable dans d'autres pays, pouvant ainsi atteindre 52 %

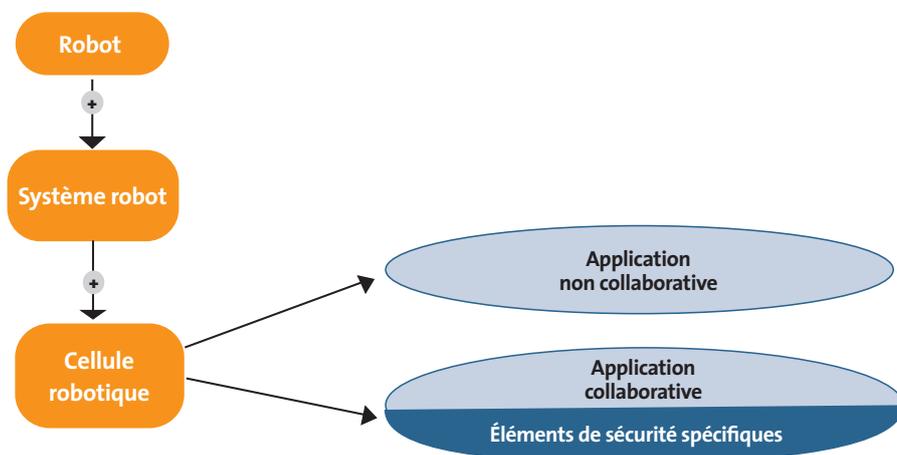
au Japon à l'horizon 2030 [11]. Toutefois, l'automatisation se heurte à la difficulté de reproductibilité ou de modélisation de la complexité du mouvement humain [12]. En effet, l'humain est un système multimodèle, adaptatif, ayant la capacité d'apprendre et pouvant ajuster son comportement aux sollicitations extérieures. Dans ce contexte, une solution alternative à la robotisation industrielle concerne l'apport d'une robotique avec laquelle l'opérateur peut interagir sur son poste de travail, situation communément appelée « robotique collaborative » [13]. Bien que très souvent utilisée, cette notion est très complexe. En effet, elle fait référence à plusieurs notions et notamment à la classification des robots [14, 15], des systèmes robotiques [14, 16], des interactions humain-robot [17], des conditions des interactions physiques humain-robot [18] et de l'environnement dans lequel le robot est utilisé (normes NF EN ISO 13482 - Robots et composants robotiques - Exigences de sécurité - Robots non médicaux pour les soins personnels, ISO 8373 - Robots manipulateurs industriels...). L'organisation internationale de normalisation (ISO) définit le robot collaboratif comme étant « *un robot conçu pour interagir directement avec l'humain* » [15]. Selon l'utilisation ou le secteur d'activité envisagé, les définitions, les exigences et les réglementations applicables au robot sont toutefois différentes. Par exemple, dans le cadre d'une utilisation en milieu hospitalier, la norme NF EN ISO 13482 (Robots et composants robotiques – Exigences de sécurité - Robots non médicaux pour les soins personnels) définit le robot de service comme un « *robot qui exécute des tâches utiles pour les personnes, ou équipement d'application d'automatisation industrielle* ». De même, le robot d'assistance à la personne

est un « *robot de service accomplissant des actions qui contribuent directement à l'amélioration de la qualité de vie des individus, à l'exclusion des applications médicales* ». Ces robots d'assistance physique (RAP) peuvent eux-mêmes être de deux natures : les robots d'assistance physique sans contention (RAPsc), qui ne sont pas solidaires du corps humain, et les robots d'assistance physique avec contention (RAPac), qui sont solidaires du corps humain (par exemple les exosquelettes robotisés).

Les domaines d'applications visés par les robots et les RAP peuvent être multiples (militaire, industriel, médical...). Dès lors que l'utilisation d'un robot est envisagée en milieu industriel, il faut se référer à la norme NF EN ISO 10218-1 (Robots et dispositifs robotiques - Exigences de sécurité pour les robots industriels - Partie 1 : robots) qui définit le robot comme étant un bras manipulateur programmable destiné à des applications industrielles multiples. Il doit évoluer sur au moins trois axes et peut être fixe ou mobile. Par définition, le robot industriel n'a pas d'application spécifique. Ce sont principalement le choix de l'outil et des différents équipements mis en œuvre autour du robot qui vont définir l'utilisation qui va en être faite. La notion de « système robot » est alors utilisée. Ce système, complété par des moyens de protection, est ensuite défini par la norme comme étant une cellule robotique (figure 1).

La notion de collaboration est ensuite liée au besoin de l'industriel et à l'application envisagée. Celle-ci peut être collaborative ou non. Si aucune collaboration n'est envisagée, il est possible de recourir à des moyens de protection « traditionnels » tels que des protecteurs fixes ou mobiles. Si l'application nécessite une collaboration humain/

Figure 1 : La robotique en milieu industriel



robot, il est alors nécessaire d'ajouter des éléments de sécurité spécifiques, permettant ainsi à chacun d'exercer ses tâches respectives. Ces éléments de sécurité peuvent être intégrés dans le robot, on parle alors de robots aptes à la collaboration.

Lorsqu'un RAPsc est utilisé en milieu industriel, il est alors considéré comme un robot industriel collaboratif, communément appelés « cobot ».

LES DIFFÉRENTS MODES DE COLLABORATION

L'évolution des concepts de robotique classique vers la robotique collaborative est argumentée par les avantages de cette nouvelle situation de travail qui associerait l'intelligence, l'expertise et l'adaptabilité de l'humain avec la robustesse et la fiabilité d'un robot [13, 19 à 23]. Ainsi, dans cette situation de travail collaboratif [20], le robot pourrait prendre en charge la réalisation des tâches simples, monotones ou à forte charge physique et l'humain serait plus à même de prendre des décisions en fonction des aléas de la production ou de se concentrer

sur la tâche en mettant en œuvre son expérience et sa créativité. Cette association aurait des retentissements positifs à la fois [13] :

- du point de vue ergonomique : moins de sollicitations physiques des opérateurs, déplacement des objets lourds et encombrants, manipulation intuitive, prévention des accidents, aide pour l'opérateur sur le positionnement des objets et pour la réalisation de mouvements appropriés tout en préservant son expertise ;
- du point de vue de la productivité : mouvements réalisés plus rapidement, amélioration de la qualité et de la précision.

Différentes catégories d'interaction robot-humain peuvent être identifiées [17] : spatiale (commune, séparée, sur le même/différent poste de travail) ; liée au niveau de décision du robot (d'autonome à télé-manipulé) ; selon le rôle de l'humain dans l'interaction (superviseur, opérateur, programmeur, observateur ou « collègue de travail »). En fonction du type d'interaction, différentes solutions peuvent être adoptées pour la sécurité et le robot pourra être amené à s'arrêter, contourner, suivre, s'approcher de l'utilisateur ou le toucher. Pour les situations où le robot est en contact direct avec

l'utilisateur [24], l'humain peut être amené à suivre le mouvement du robot dans un objectif d'apprentissage [25] ou l'humain peut exercer une force sur le robot qui suit alors l'intention du mouvement de l'humain [26, 27].

Dans le secteur industriel, ces différents types d'interaction homme-robot peuvent être classés selon trois familles (figure 2 page suivante) :

- collaboration directe : l'opérateur et le robot travaillent simultanément à la réalisation d'une même pièce. Dans le cadre d'une collaboration directe, il est possible d'envisager le cas où l'opérateur guide le robot (RAPsc). De fait, l'opérateur ne manipule pas l'outil directement mais manipule le terminal du robot sur lequel est fixé l'outil ; le terminal développe un effort démultiplié par rapport à l'effort exercé par l'opérateur ;
- collaboration indirecte : l'opérateur et le robot travaillent sur une même pièce, mais leurs actions sont alternées ;
- partage d'espace de travail : l'opérateur et le robot effectuent des tâches distinctes pour lesquelles ils peuvent être amenés à partager leur espace de travail.

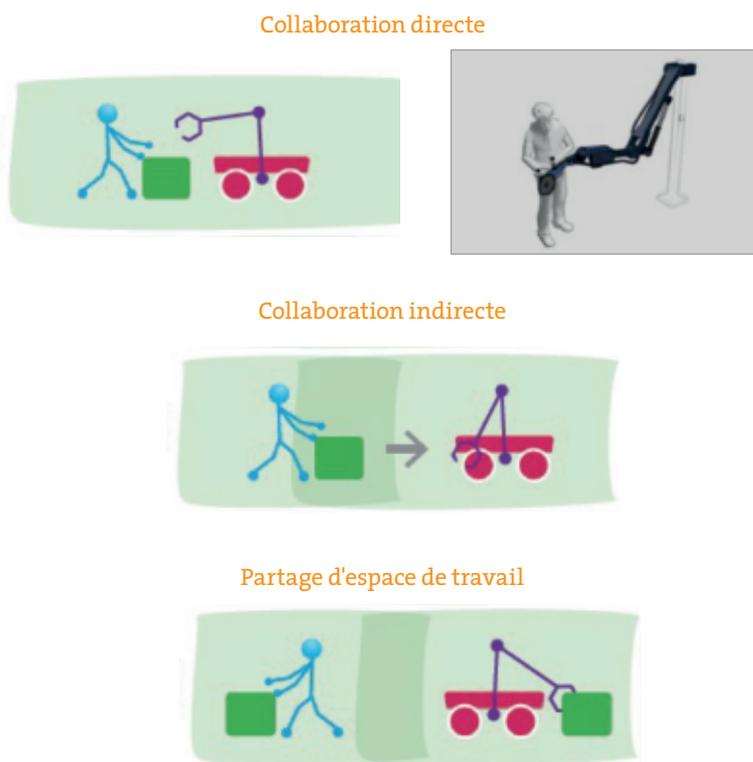
ATTENTES DES INDUSTRIELS

Face aux évolutions technologiques proposées par les fabricants et à la diversité des situations de travail collaboratives envisageables, les attentes des industriels sont nombreuses et diverses.

Afin d'identifier les besoins des industriels déjà utilisateurs de robots en termes de collaboration humain/robot, une étude a été conduite par l'INRS [28, 29]. Quarante-deux entretiens ont été menés au sein de 21 entreprises différentes sur l'ensemble du territoire français. Le nombre

Robotique collaborative : enjeux de santé et de sécurité au travail

Figure 2 : Types d'interactions homme-robot



de salariés employés par ces entreprises variait de quelques personnes à plusieurs milliers. Les secteurs d'activités concernés couvraient les principaux utilisateurs de robots recensés par la fédération internationale de la robotique (*International Federation of Robotics – IFR*).

Les résultats de l'étude ont montré que les attentes des industriels sont multiples (*tableau I*). Plus de 60 % des personnes interrogées exprimaient un intérêt pour la robotique collaborative. Prenant en compte les différents besoins exprimés par les entreprises, elles peuvent envisa-

ger des situations de travail faisant référence aux différents modes de collaboration : collaboration directe (28 %), collaboration indirecte (11 %) ou partage d'espace de travail (61 %). Parmi les industriels envisageant de recourir à la collaboration directe, près de la moitié d'entre eux estime que le guidage manuel du robot (cas particulier de la collaboration directe) peut répondre à leurs attentes, en particulier pour les phases d'apprentissage ou de maintenance.

Malgré les attentes fortes des industriels, la présence en situation réelle de travail de ces nouvelles formes de travail se trouve encore souvent au niveau de projet [15, 26, 27, 30]. En réalité, la « situation de collaboration » est très complexe à concevoir et à mettre en œuvre et même des tâches simples (déplacement d'objet) sont très difficiles à envisager [31]. Cette complexité est notamment liée à la nécessité de couvrir de nombreux risques qui jusqu'alors étaient couverts par la « mise en cage » des robots [19, 21, 32].

IDENTIFICATION DES RISQUES LIÉS À LA ROBOTIQUE COLLABORATIVE

Pour les situations de travail incluant un robot qui est à proximité de l'opérateur et qui interagit avec celui-ci en l'absence d'une barrière physique de sécurité, la première préoccupation des concepteurs de robots et des intégrateurs est la sécurité des utilisateurs [24, 33].

Une identification des principaux risques liés à la mise en œuvre de robots industriels est détaillée dans l'annexe A de la norme EN ISO 10218-1 : « *Risques mécaniques, électriques, thermiques, liés au bruit, liés*

↓ **Tableau I**

► **EXPRESSION DES BESOINS DE COLLABORATION HUMAIN-ROBOT**

① Faciliter la réalisation des opérations de maintenance	28 %
② Faciliter la réalisation des opérations liées au process à proximité du robot	18 %
③ Faciliter l'intégration de la cellule robotisée	15 %
④ Réduire les troubles musculosquelettiques	9 %
⑤ Pallier des problèmes techniques	9 %
⑥ Vitrine technologique	9 %
⑦ Faciliter la réalisation d'opération de réglages	6 %
⑧ Améliorer la mobilité et la réutilisation du robot	6 %

aux vibrations, liés aux radiations, liés aux substances, liés à l'ergonomie, liés à l'environnement dans lequel la machine est utilisée, et toutes combinaisons de ces risques ». L'intégralité de ces risques est présente dans les situations de collaboration humain-robot. Néanmoins, compte tenu de la proximité immédiate entre le robot et l'humain, les risques mécaniques et ceux liés à la charge physique, mentale et psychique des opérateurs deviennent alors prépondérants.

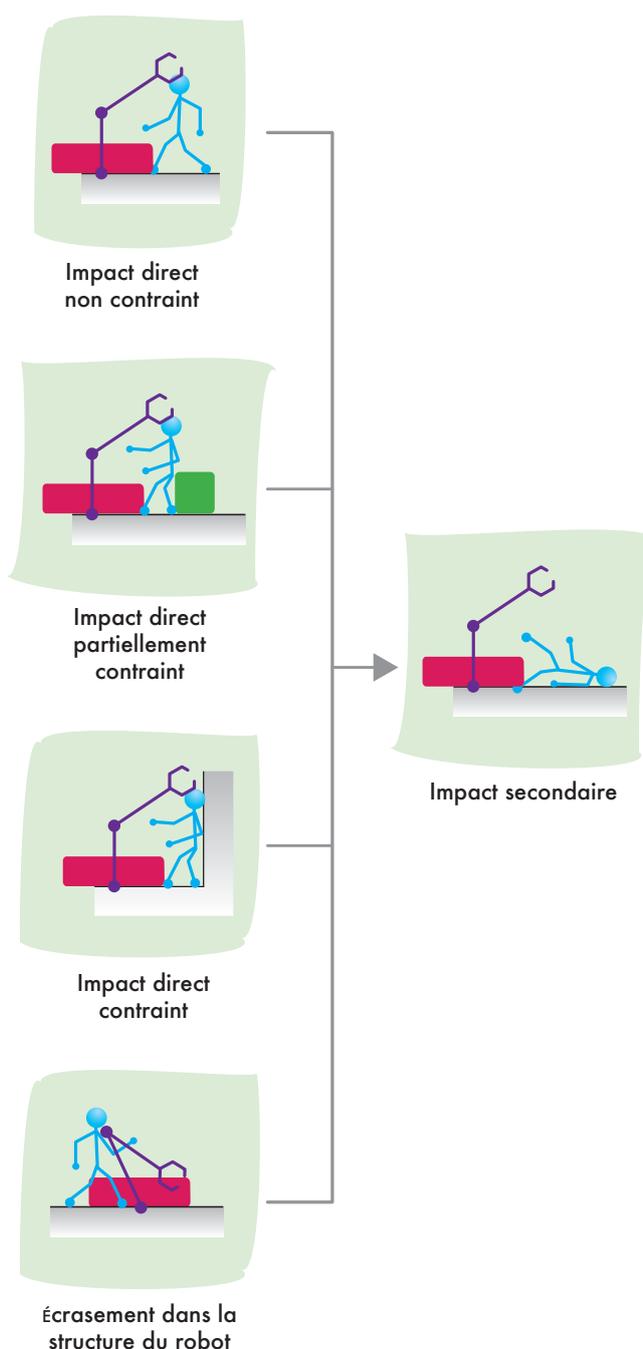
RISQUES MÉCANIQUES

Du fait de la diversité des situations de travail en robotique collaborative, les scénarios de contact entre l'humain et le robot sont multiples (figure 3) : impact direct non contraint, partiellement contraint ou contraint, écrasement dans la structure du robot, impact secondaire. Ces contacts peuvent entraîner des blessures par écrasement, cisaillement, des chocs ou encore, selon la nature de l'activité, peuvent être à l'origine de coupures, de sectionnements, de perforations...

Prenant en compte le fonctionnement du robot vis-à-vis de l'humain avec qui il partage l'espace de collaboration [16], plusieurs stratégies peuvent être envisagées : le robot s'arrête, est manipulé par l'opérateur, change de vitesse et de position ou limite les forces de contact. Sur la base d'une démarche classique de réduction des risques (NF EN ISO 12100, 2010 - Sécurité des machines - Principes généraux de conception - Appréciation du risque et réduction du risque), et pour les situations de collaboration présentées, plusieurs solutions de réduction du risque mécanique peuvent être proposées (figure 4 page suivante) :

- évitement du contact : afin d'éviter tout contact entre le robot et l'opérateur, on privilégiera la mise

Figure 3 : Scénarios de contact entre l'humain et le robot (d'après [34])

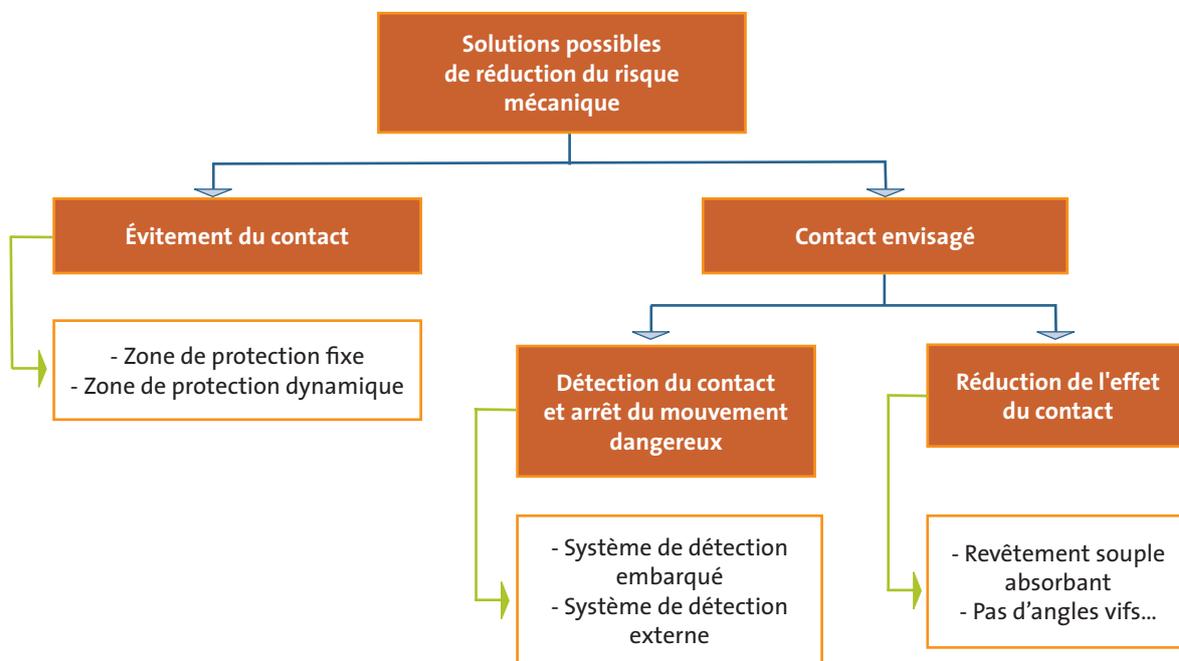


en œuvre de dispositifs techniques capables de détecter la présence de l'opérateur à proximité du robot. La zone de détection pourra, selon la technologie retenue, être fixe autour du robot ou dynamique en

fonction de sa position ;

- si le contact est envisagé : dans ce cas, il est nécessaire de recourir à des dispositifs techniques permettant d'arrêter le mouvement dangereux dès la détection du contact.

Figure 4 : Solutions possibles de réduction du risque mécanique



À noter que cette solution de réduction du risque ne pourra être envisagée que si les résultats de l'analyse des risques le permettent et que si toutes les précautions sont prises afin de respecter les valeurs seuils de puissance et d'effort spécifiées dans le document ISO/TS 15066 (Robots et dispositifs robotiques - Robots coopératifs). En complément aux dispositifs de détection de contact qui vont arrêter le mouvement dangereux, des mesures en amont doivent être prises en vue de réduire la gravité du dommage dû au contact. Il peut s'agir de recouvrir le robot d'un matériau absorbant, de limiter les angles vifs ou de tout autre moyen permettant de limiter l'effet du contact du robot sur l'opérateur.

Dans le cas d'assistance physique/ au geste/à la manipulation ou avec les systèmes d'assistance physique guidés par l'opérateur (RAPsc), la sécurité doit être assurée par un dispositif de validation à commande maintenue et par un arrêt d'urgence comme exigé par la norme EN ISO 10218-1.

FACTEURS DE RISQUE DE TMS

La suppression des protecteurs physiques autour des cellules robotiques afin de permettre la collaboration humain-robot soulève également des questions relatives à l'exposition des opérateurs aux différents facteurs de risque de TMS.

FACTEURS DE RISQUES BIOMÉCANIQUES

Souvent, le développement de RAPsc est justifié par une volonté de réduction des efforts développés par les opérateurs lors de la manipulation des objets encombrants et lourds [19, 27, 31]. Ainsi, selon le type de cobot et le type de tâche réalisée, il est possible d'observer des réductions de forces de préhension [35] ou de port de charges [36] ou, au contraire, des difficultés de coordination et de stabilité pouvant impacter l'équilibre de l'opérateur [19, 31], et modifier la direction et l'amplitude des forces exercées [19, 37].

Du point de vue de la cinématique, une étude a montré que les angles de flexion du tronc étaient simi-

lares lors des tâches d'acquisition, de déplacement et de positionnement de charge avec ou sans RAP [35]. Ces résultats ont été confirmés par une autre étude qui concernait une tâche de vissage au-dessus de la tête en situation d'assistance par un exosquelette robotisé [36]. Les auteurs ont tout de même spécifié que suivant les conditions de réalisation de la tâche où l'assistance est maximale, l'exosquelette robotisé impose au sujet de suivre son mouvement, contrairement aux principes élémentaires avancés en ergonomie qui préconisent une adaptation de la machine à l'humain et pas l'inverse. Dans d'autres cas, il a été démontré que les caractéristiques du RAPsc (longueurs des segments et directions des axes de mouvement) ainsi que le degré d'assistance pouvaient avoir un impact sur les angles et les moments articulaires [38], avec parfois des effets opposés selon le type de RAPsc considéré. Dans un objectif de conception d'un RAPsc prenant en compte des indicateurs ergonomiques, une étude fondée sur la

simulation numérique d'une tâche de vissage a été menée. Les résultats montrent que la géométrie du robot et le coefficient d'assistance pouvaient avoir une influence sur la position des pieds, la cinématique du tronc et du membre supérieur (moment de force), la position de la main et la direction du mouvement de la tâche réalisée [22]. Bien que très utile en phase de conception, la simulation présentait certaines limites soulignées par les auteurs, notamment : l'absence de prise en compte de la répétitivité des mouvements réalisés, les limites de l'utilisation des fonctions d'optimisation qui peuvent donner une solution de réalisation du mouvement à l'encontre du mouvement réalisé réellement, les limites des modèles cinématiques qui peuvent sous-estimer l'exposition de l'utilisateur du robot aux facteurs de risque biomécanique.

FACTEURS DE RISQUES PSYCHOSOCIAUX

Au-delà des facteurs biomécaniques, la conception de la nouvelle situation de travail doit être réalisée de manière à n'induire aucune « réaction déplaisante pour l'utilisateur telle que la peur, le choc ou la surprise » (« *unpleasant reactions like fear, shock or surprise* ») [15]. Ainsi, une étude a montré que les sujets gardaient une distance de 0,5 m avec le robot et que la vitesse de mouvement du sujet augmentait avec l'accélération du mouvement du robot [39]. D'autres travaux, sur la base de mesures physiologiques (conductance cutanée), ont montré que les sujets éprouaient de la peur à proximité (1 m de distance) d'un robot en mouvement (à plus de 500 mm/s) [40]. Les auteurs ont conclu que même si les spécifications techniques pouvaient convenir du point de vue de la sécurité

physique, la situation de collaboration humain-robot pouvait exposer le participant à des facteurs de risque psychologiques.

En plus de la sécurité et des facteurs déjà évoqués, l'analyse de la charge cognitive de l'humain dans sa « collaboration » avec le robot a une réelle importance [41]. Ainsi, il a été démontré que la cinématique et la vitesse du mouvement du robot ainsi que la prise d'information relative à la position du sujet prise en compte dans le développement du robot pouvaient avoir une influence sur le confort ressenti par les sujets (évalué à l'aide d'une échelle analogique de 1, peu confortable, à 9, très confortable) et la charge cognitive du sujet (temps de fixation visuelle et nombre de changements de direction des yeux entre l'objet présenté et une autre partie du robot). Dans cette étude de laboratoire, la situation jugée comme la plus confortable par le sujet était celle où il se trouvait face à un robot dont le mouvement était réalisé dans un plan, à vitesse modérée et qui prenait en compte la position de celui-ci par rapport aux situations où le robot réalisait des mouvements à des vitesses extrêmes (très lentes ou très rapides) et qui ne prenaient pas en compte la position du sujet (collaboration directe et indirecte).

DISCUSSION

Comme l'ont montré les résultats des études antérieures sur le sujet, l'intérêt des industriels pour la robotique collaborative est évident. Néanmoins, ces évolutions techniques soulèvent des questions liées à la santé et à la sécurité des opérateurs (risques mécaniques, impacts aussi bien sur les aspects biomécaniques, cognitifs et psycho-

sociaux que sur des facteurs organisationnels) mais également d'ordre technique (mise en œuvre des moyens de prévention) ou industriel (apport effectif de la robotique collaborative). Dans ces conditions, il a été recommandé d'avoir une approche proactive pour évaluer ces nouvelles formes de travail en incluant [15] : l'évaluation qualitative des facteurs de risque, la possibilité pour l'utilisateur d'adapter ses stratégies et redéfinir les exigences de sécurité, la prise en compte d'un niveau approprié de précaution pour une situation de collaboration en toute sécurité, la généralisation des recommandations en termes de santé et sécurité à tous les cas d'application, l'engagement des entreprises et l'implication effective des managers dans la mise en place de ce type de situation de travail.

L'analyse de la littérature a mis en avant un manque de connaissances concernant l'utilisation des RAPsc porte-outil. Seule une étude concernait un RAPsc utilisé lors d'une tâche de vissage [38]. Celle-ci ne portait que sur des simulations réalisées lors de la phase de conception du cobot. De même, d'après les premiers éléments de retour d'expérience de la réalité de terrain [26, 42], il apparaît nécessaire de porter une attention à l'évaluation de ce nouveau mode de collaboration du point de vue de son impact sur l'exposition aux facteurs de risques de TMS, sur le ressenti des opérateurs ou de son impact sur les gestes professionnels, notamment lorsqu'il s'agit de tâches d'une relative précision réalisées avec un outil à main (meulage par exemple). Les phénomènes observés dans des situations de travail mettant en œuvre des robots collaboratifs sont probablement ressentis de la même façon par les utilisateurs de RAPsc qui intègrent un outil à main énergisé

pour lesquels on peut imaginer, en l'absence d'études sur le sujet, qu'ils pourraient éprouver un sentiment d'insécurité ou de non-maîtrise du mouvement du bras articulé du robot (collaboration directe). L'impact de l'usage d'un robot collaboratif sur le geste professionnel pourrait être encore plus prononcé pour ce type de RAPsc où certains risques spécifiques peuvent apparaître tels que la recherche de nouveaux repères dans la nouvelle situation de travail. Le manque de littérature sur le sujet justifie la nécessité de conduire des travaux de recherche permettant d'apporter des éléments de réponse argumentés concernant les apports réels de l'utilisation d'un robot collaboratif pour la prévention des TMS. Les industriels sont confrontés à des difficultés de mise en œuvre et s'interrogent sur l'apport effectif de certaines solutions de robotique collaborative, autant du point de vue de la santé et la sécurité au travail que sur le gain de productivité qui s'avère parfois limité. La proximité immédiate entre l'opérateur et le robot peut conduire à la mise en place de moyens de protection, de mesures techniques spécifiques ou encore de mesures organisationnelles, non nécessaires dans le cadre d'une solution robotique classique, pouvant limiter l'apport de la robotique collaborative en termes de gain de productivité ou d'optimisation de process. En effet, la suppression des protecteurs physiques pour faciliter la collaboration autour d'un robot peut, par exemple, conduire à une réduction de vitesse de celui-ci pour protéger l'opérateur des risques mécaniques et donc être un frein au gain de productivité. De même, certains travaux évoquent des résultats contradictoires concernant la durée de réalisation de la tâche, considérée comme paramètre de productivité, lors de l'utilisation d'un robot

collaboratif. Ainsi, une étude a mis en avant que, par rapport à la réalisation de la tâche sans robot, cette durée était augmentée de 25 % [19] en situation d'assemblage (positionner 5 billes dans une rotule) en collaboration. De même, lors d'un transfert de charge, l'utilisation d'un RAP augmentait la durée de la réalisation de la tâche de 36 à 63 % dans le plan sagittal de manière symétrique et de 40 à 115 % dans un plan asymétrique [35]. D'autres travaux ont montré que lors d'une tâche de vissage au-dessus de la tête, en situation d'assistance par un exosquelette robotisé, la durée de réalisation était plus longue de 12 % par rapport à la situation de vissage manuel [36]. À l'opposé, une autre étude, basée sur la simulation numérique, a montré que plus le mouvement était assisté, plus rapidement la tâche (des mouvements aller-retour d'un point A à un point B) était réalisée (diminution de 10 à 20 %) [38].

En conséquence, malgré l'intérêt et les nombreuses attentes exprimés par 64 % des personnes interrogées vis-à-vis de la robotique collaborative [28, 29], seules 43 % envisageraient d'y recourir après avoir pris connaissance des contraintes associées. Toutefois, ces résultats ne reflètent que l'opinion d'entreprises déjà utilisatrices de robots industriels et qui envisagent la mise en œuvre de robotique collaborative. Il est possible que l'intérêt pour la robotique collaborative soit plus présent dans des situations de travail difficilement automatisables pour lesquelles une solution robotique classique ne peut pas être envisagée, car incompatible avec la nécessité de conserver une intervention humaine (geste technique nécessitant un savoir-faire de l'humain) [43]. Les industriels cherchent aujourd'hui à s'approprier ces nou-

velles technologies, mais évoquent des difficultés quant aux choix des solutions techniques disponibles et à leur mise en œuvre. Ce constat est valable quel que soit le mode de collaboration envisagé mais est encore plus prononcé pour les RAPsc.

CONCLUSION

Les entreprises expriment un intérêt fort pour la robotique collaborative. Leurs attentes sont nombreuses et s'articulent autour des 2 principaux axes : prévention des TMS et amélioration de la productivité. De nombreuses innovations sont aujourd'hui proposées en vue d'améliorer ou rendre possible la collaboration humain/robot. Néanmoins, ces nouvelles situations de travail posent questions autant du point de vue de la sécurité que du point de vue de la santé des opérateurs avec une implication effective dans la prévention des TMS. En effet, la suppression des protecteurs fixes traditionnellement utilisés en robotique afin de permettre la collaboration humain-robot, réinterroge, notamment, la gestion des risques mécaniques auxquels sont exposés les opérateurs. Cette proximité peut également avoir des impacts sur les facteurs de risque de TMS. La conséquence de ces impacts est aujourd'hui encore en phase d'évaluation. La prise en compte de tous ces risques conduit à la mise en œuvre de solutions de prévention qui peuvent parfois s'avérer incompatibles avec le besoin de productivité exprimé par les industriels. La robotique collaborative induit de nouvelles formes de travail dont la complexité doit être prise en compte pour un meilleur déploiement en situation réelle. Cet article pose des prémices de discussion

pour lesquelles la recherche doit investir et amener les industriels à réfléchir sur leur besoin de mise en place d'une situation impliquant la robotique collaborative mais également sur les éventuelles limites des nouvelles technologies proposées par les fabricants.

POINTS À RETENIR

- Trois types de situations de travail collaboratives sont identifiées : partage d'espace de travail, collaboration indirecte et collaboration directe.
- L'utilisation d'un robot d'assistance physique sans contention est un cas particulier de collaboration directe.
- La proximité entre l'opérateur et le robot peut conduire à l'apparition de risques nouveaux : mécaniques et troubles musculosquelettiques (TMS).
- Une analyse préliminaire de l'activité permet d'identifier le type de collaboration homme-robot à mettre en place en vue de prévenir les TMS et améliorer la productivité.
- Deux stratégies sont identifiées afin d'assurer la réduction des risques mécaniques : évitement du contact et réduction des effets de celui-ci.
- La mise en œuvre d'une situation de travail intégrant une collaboration homme-robot doit tenir compte de l'analyse de l'ensemble des facteurs de risque de TMS (biomécaniques, psychosociaux, organisationnels).

BIBLIOGRAPHIE

- 1 | **APTEL M, CAIL F, AUBLET-CUVELIER A** - Les troubles musculosquelettiques du membre supérieur (TMS-MS). Guide pour les préventeurs. 2^e édition. Édition INRS ED 957. Paris : INRS ; 2011 : 96 p.
- 2 | Nouveau rapport sur la déclaration des maladies professionnelles : problématique et bonnes pratiques dans cinq pays européens. Eurogip, 2015 (<https://eurogip.fr/nouveau-rapport-sur-la-declaration-des-mp/>).
- 3 | Priorities for occupational safety and health research in Europe: 2013-2020. European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA), 2013 (<https://osha.europa.eu/en/publications/priorities-occupational-safety-and-health-research-europe-2013-2020>).
- 4 | **SAUTTER B** - Futuring European industry: assessing the ManuFuture road towards EU re-industrialization. *Eur J Futures Res.* 2016 ; 4 (1) : 25.
- 5 | RAP 2030. Utilisation des robots d'assistance physique à l'horizon 2030 en France. Prospectives en santé et sécurité au travail. Édition INRS VEP 1. Paris : INRS ; 2015 : 259 p.
- 6 | **COUTO A** - Dopés par l'innovation, les cobots gagnent du terrain sur les robots traditionnels. Industrie et technologies. Veille technologique pour les professionnels de l'industrie, L'Usine Nouvelle, 2021 (<https://www.industrie-techno.com/article/dopes-par-l-innovation-les-cobots-gagnent-du-terrain-sur-les-robots-traditionnels.63674>).
- 7 | **LAVICOLI S** - The new EU occupational safety and health strategic framework 2014-2020: objectives and challenges. *Occup Med* (London). 2016 ; 66 (3) : 180-82.
- 8 | **LAURENT L** - Les robots d'assistance physique: utilisations et conséquences santé-travail à l'horizon 2030. Extrait de : NAHON S, FALZON P (Eds) Ergonomie et développement pour tous. 49^e Congrès de la Société d'ergonomie de langue française (SELF). Actes du congrès. La Rochelle, 1-3 octobre 2014. Toulouse : SELF ; 2014 : 484 p.
- 9 | Automatisation et travail indépendant dans une économie numérique. Synthèses sur l'avenir du travail. OCDE, 2016 (<https://www.oecd.org/fr/els/emp/Automatisation%20et%20travail%20ind%20C3%A9pendant%20dans%20une%20C3%A9conomie%20num%20C3%A9rique.pdf>).
- 10 | **FREY CB, OSBORNE M** - The Future of Employment: How susceptible are jobs to computerisation? Oxford Martin Programme on Technology and Employment. Oxford Martin School and University of Oxford, 2013 (<https://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/publications/the-future-of-employment/>).
- 11 | **MANYIKA J, LUND S, CHUI M, BUGHIN J ET AL.** - Jobs lost, jobs gained: workforce transitions in a time of automation. San Francisco : McKingsey Global Institute ; 2017 : 160 p.
- 12 | **BARBE L** - Téléopération avec retour d'effort pour les interventions percutanées. Thèse pour obtenir le grade de Docteur. Discipline : Sciences pour l'ingénieur (Spécialité : Robotique. Strasbourg : Université Louis Pasteur, Strasbourg I ; 2007 : 189 p.
- 13 | **PESHKIN M, COLGATE JE** - Cobots. *Ind Rob.* 1999 ; 26 (5) : 335-41.
- 14 | **COIFFET P** - Robots industriels : concepts, définitions et classifications. Paris : Techniques de l'ingénieur ; 2007 : 13 p.
- 15 | **MURASHOV V, HEARL F, HOWARD J** - Working safely with robot workers: Recommendations for the new workplace. *J Occup Environ Hyg.* 2016 ; 13 (3) : D61-71.
- 16 | **FRYMAN J, MATTHIAS B** - Safety of Industrial Robots: From Conventional to Collaborative Applications. Paper presented at the 7th International Conference on the Safety of Industrial Automated Systems (SIAS), Montreal, Canada. October 11-12, 2012. Bibliothèque et Archives nationales du Québec, IRSST, 2012 (<https://www.irsst.qc.ca/publications-et-outils/publication/i100668/n/sias-2012-actes-de-la-conference>).
- 17 | **YANCO HA, DRURY J** - Classifying human-robot

BIBLIOGRAPHIE (suite)

- interaction: an updated taxonomy. Paper presented at the 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 10-13 October 2004. The Hague, Netherlands. In: IEEExplore. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2004 (<https://ieeexplore.ieee.org/document/1400763>).
- 18 | DE SANTIS A, SICILIANO B, DE LUCA A, BICCHI A - An atlas of physical human-robot interaction. *Mech Mach Theory*. 2008 ; 43 (3) : 253-70.
- 19 | CHERUBINI A, PASSAMA R, CROSNIER A, LASNIER A ET AL. - Collaborative manufacturing with physical human-robot interaction. *Robot Comput Integr Manuf*. 2016 ; 40 : 1-13.
- 20 | FABER M, BÜTZLER J, SCHLICK CM - Human-robot Cooperation in Future Production Systems: Analysis of Requirements for Designing an Ergonomic Work System. *Procedia Manuf*. 2015 ; 3 : 510-17.
- 21 | JIASSI S, TLIBA S, CHITOUR Y - On Human-Robot Co-manipulation for Handling Tasks : Modeling and Control Strategy. *IFAC Proc Vol*. 2012 ; 45 (22) : 710-15.
- 22 | MAURICE P, PADOIS V, MEASSON Y, BIDAUD P - Human-oriented design of collaborative robots. *Int J Ind Ergon*. 2017 ; 57 : 88-102.
- 23 | MOULIÈRES-SEBAN T, BITONNEAU D, SALOTTI JM, THIBAUT JF ET AL. - Human Factors Issues for the Design of a Cobotic System. In: AREZES P (Ed) - Advances in Safety Management and Human Factors: Proceedings of the AHFE 2016 International Conference on Safety Management and Human Factors, July 27-31, 2016, Walt Disney World®, Florida, USA. (pp. 375-385). Advances in Intelligent Systems and Computing Cham: Springer International Publishing AG ; 2016 : 375-85, 562 p.
- 24 | SURDILOVIC D, BERNHARDT R - Novel interactive human-robot-systems. In: HORACEK P, SLIMANDL M, ZITEK P (Eds) - IFAC 2005 : selected plenaries, milestones and surveys, July 3-8 2005. 16th Triennial World Congress, Prague, Czech Republik. Prague : International Federation of Automatic Control ; 2005 : 353 p.
- 25 | ERDEN MS, MARIĆ B - Assisting manual welding with robot. *Robot Comput Integr Manuf*. 2011 ; 27 (4) : 818-28.
- 26 | ATAIN KOUADIO JJ, SGHAIER A, PICOT D - Les Robots d'Assistance Physique : fonctionnement, utilisation en industrie et enjeux santé et sécurité au travail. Extrait de : Articulation performance et santé dans l'évolution des systèmes de production. 50^e Congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française (SELF). Recueil de l'ensemble des Actes. Paris, 23-25 septembre 2015. Toulouse : SELF ; 2015 : 560-67, 608 p.
- 27 | GONZALEZ DE SANTOS P, ESTREMEIRA J, GARCIA E, ARMADA M - Power assist devices for installing plaster panels in construction. *Autom Constr*. 2008 ; 17 (4) : 459-66.
- 28 | TIHAY D, PERRIN N - Human-robot coactivity: need's analysis. In: SIAS 2018. 9th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems. Nancy, 10-12 octobre 2018. Vandoeuvre-lès-Nancy : INRS ; 2018 : 40-47, 330 p.
- 29 | TIHAY D - Robotique collaborative : perception et attentes des industriels. Études et solutions. Notes techniques NT 58. *Hyg Secur Trav*. 2018 ; 250 : 50-57.
- 30 | KRÜGER J, LIEN TK, VERL A - Cooperation of human and machines in assembly lines. *CIRP Ann*. 2009 ; 58 (2) : 628-46.
- 31 | KRÜGER J, SURDILOVIC D - Robust control of force-coupled human-robot-interaction in assembly processes. *CIRP Ann*. 2008 ; 57 (1) : 41-44.
- 32 | LASOTA PA, SHAH JA - Analyzing the effects of human-aware motion planning on close-proximity human-robot collaboration. *Hum Factors*. 2015 ; 57 (1) : 21-33.
- 33 | JANSEN A, VAN DER BEEK D, CREMERS A, NEERINGX M - Emergent risks to workplace safety; working in the same space as a cobot. Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO), 2018 (<http://resolver.tudelft.nl/uuid:6dc7b018-e77f-4bc2-8988-63a96a510f11>).
- 34 | VASIC M, BILLARD A - Safety Issues in Human-Robot Interactions. Paper presented at the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 6-10 May 2013. Karlsruhe, Germany. In: IEEExplore. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2013 (<https://ieeexplore.ieee.org/document/6630576>).
- 35 | NUSSBAUM MA, CHAFFIN DB, STUMP BS, BAKER G ET AL. - Motion times, hand forces, and trunk kinematics when using material handling manipulators in short-distance transfers of moderate mass objects. *Appl Ergon*. 2000 ; 31 (3) : 227-37.
- 36 | SYLLA N, BONNET V, COLLEDANI F, FRAISSE P - Ergonomic contribution of ABLE exoskeleton in automotive industry. *Int J Ind Ergon*. 2014 ; 44 (4) : 475-81.
- 37 | KUIJT-EVERS LFM, BOSCH T, HUYSMANS MA, DE LOOZE MP ET AL. - Association between objective and subjective measurements of comfort and discomfort in hand tools. *Appl Ergon*. 2007 ; 38 (5) : 643-54.
- 38 | MAURICE P, MEASSON Y, PADOIS V, BIDAUD P - Assessment of Physical Exposure to Musculoskeletal Risks in Collaborative Robotics Using Dynamic Simulation. In: PADOIS V, BIDAUD P, KHATIB O (Eds) - Romansy 19. Robot Design, Dynamics and Control. Proceedings of the 19th CISM-Ifomm Symposium. International Centre for Mechanical Sciences (CISM). Courses and Lectures Vol. 544. Vienna : Springer ; 2013 : 325-32, 390 p.
- 39 | BORTOT D, DING H, ANTONOPOULOS A, BENGLER K - Human motion behavior while interacting with an industrial robot. *Work*. 2012 ; 41 (Suppl 1) : 1699-707.
- 40 | ARAI T, KATO R, FUJITA M - Assessment of operator stress induced by robot collaboration in assembly. *CIRP Ann*. 2010 ; 59 (1) : 5-8.
- 41 | DEHAIS F, SISBOT EA, ALAMI R, CAUSSE M - Physiological and subjective evaluation of a human-robot object hand-over task. *Appl Ergon*. 2011 ; 42 (6) : 785-91.
- 42 | ATAIN KOUADIO JJ, SGHAIER A - Les robots et dispositifs d'assistance physique: état des lieux et enjeux pour la prévention. Note scientifique et technique NS 354. Paris : INRS ; 2017 : 44 p.
- 43 | EL ZAATARI S, MAREI M, LI W, USMAN Z - Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview. *Rob Auton Syst*. 2019 ; 116 : 162-80.