



HAL
open science

Les robots et dispositifs d'assistance physique : état des lieux et enjeux pour la prévention

Jean-Jacques Atain-Kouadio, Adel Sghaier

► To cite this version:

Jean-Jacques Atain-Kouadio, Adel Sghaier. Les robots et dispositifs d'assistance physique : état des lieux et enjeux pour la prévention. [Rapport de recherche] Notes scientifiques et techniques NS 354, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). 2017, 44 p. hal-01808404

HAL Id: hal-01808404

<https://hal.science/hal-01808404v1>

Submitted on 5 Jun 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

scientifique & technique
note
note scientifique
& technique
scientifique
technique

**Les robots et dispositifs
d'assistance physique :
état des lieux et enjeux
pour la prévention**

Les robots et dispositifs d'assistance physique : état des lieux et enjeux pour la prévention

Jean-Jacques Atain Kouadio

Département Homme au travail

Laboratoire Ergonomie et psychologie appliquées à la prévention

Adel Sghaier

Département Ingénierie des équipements de travail

Laboratoire Sécurité des équipements de travail et des automatismes

NS 354
octobre 2017

Les robots et dispositifs d'assistance physique : État des lieux et enjeux pour la prévention

Jean-Jacques Atain Kouadio et Adel Sghaier

NS 354
Octobre 2017

SOMMAIRE

1. Introduction.....	6
2. Contexte normatif et définitions.....	6
3. Descriptions et principes des robots d'assistance physique.....	8
3.1. Les RAPsc (« Cobot »).....	8
3.2. Les RAPac (ou exosquelette).....	10
3.3. Les dispositifs d'assistance physique	12
4. Acteurs majeurs du marché en France	12
4.1. Le CEA-Tech.....	12
4.2. La société RB3D	13
4.2.1. Le « cobot ».....	13
4.2.2. Exosquelette Hercule de RB3D.....	14
5. Informations issues de la bibliographie et de l'étude du marché	16
5.1. RAPsc « Sarrazin technologies ».....	16
5.2. Le robot collaboratif du CEA Tech.....	16
5.3. Le prototype d'exosquelette pour l'entreprise de BTP Colas	17
5.4. Le dispositif MANTIS® (<i>LockHead Martin</i>)	18
5.5. Le dispositif EXHAUSS®.....	18
5.6. Dispositif CORFOR ®	20
5.7. Le dispositif SuitX®	21
6. Retours d'expérience du terrain	21
6.1. Les Rap sans contention.....	21
6.1.1. Entreprise de rechappage, recreusage et réparation de Pneus.....	21
6.1.2. Fonderie réalisant de la conception, de l'usinage et de l'assemblage de pièces métalliques.....	22
6.1.2.1. Version légère d'assistance au meulage robotisée.....	26
6.1.3. Groupe Holvia Porc	27
6.2. Les exosquelettes à contention.....	28
6.2.1. Entreprise de maçonnerie.....	28
6.2.2. Exemple dans la maintenance nucléaire.....	29
6.2.3. Entreprise de plâtrerie	30
6.2.4. Evolution de l'exosquelette pour le tirage de bitume	31
6.3. Synthèse des constats recueillis sur le terrain	32
7. Enjeux pour la santé et la sécurité au travail	33

7.1.	Questions et points de vigilance pour les RAPsc.....	33
7.1.1.	Risques d'accident du travail.....	33
7.1.2.	Risques en lien avec la charge physique	34
7.1.3.	Risques psychologiques en lien avec l'interaction homme robot.....	36
7.2.	Questions et point de vigilance RAPac et dispositifs d'assistance physique non énergisés.	36
7.2.1.	Risques d'accident du travail.....	36
7.2.2.	Risques en lien avec la charge physique de travail	37
7.2.3.	Risques psychologiques en lien avec l'interaction homme robot.....	37
8.	Perspectives	38

Table des Illustrations

Figures :

Figure 1. Hiérarchie des robots industriels.....	7
Figure 2. Classification des robots	8
Figure 3. Poignée de validation à 3 positions (Source : Mécaprev (https://machines-sures.inrs.fr/)	9
Figure 4. Poignée de commande avec présence main à capteur infrarouge (Crédits RB3D).....	9
Figure 5. Le « Cobot » de RB3D (Crédits RB3D)	10
Figure 6. Exosquelette « Hercule » (Crédits RB3D).....	10
Figure 7. Assistance physique membre supérieur (© Deledda)	11
Figure 8. Assistance physique corps entier (© Deledda)	11
Figure 9. Système d'assistance aux gestes dextres Crédit photo : Philippe Stroppa/CEA.....	12
Figure 10. Système d'assistance aux efforts (Crédit photo : Cyrille Dupont/CEA)	13
Figure 11. Cobot RB3D dans une situation de meulage (©INRS/Ferry Capitain)	14
Figure 12. Version militaire initiale d'Hercule (Crédits RB3D).....	14
Figure 13. Version civile d'Hercule (Crédits RB3D).....	15
Figure 14. Exopush 1 avec bras et jambes robotisés (Crédits photos Colas).....	15
Figure 15. Exo-Up avec bras et jambes (Crédits photos Point P)	15
Figure 16. Manipulateur à compensation de masse de la société Sarrazin technologies. Crédit photo : Philippe Stroppa/CEA	16
Figure 17. Robot collaboratif ISYBOT (Crédit photo : Francis Rhodes/CEA & ISYBOT)....	16
Figure 18. Actionneur hautement réversible (Crédit photo : Philippe Stroppa/CEA).....	17
Figure 19. Utilisation de l'exosquelette Hercule par Colas (Crédits photos Colas).....	17
Figure 20. Travaux de BTP assistés par Hercule (Crédits photos Colas).....	18
Figure 21. Différents dispositifs d'assistance proposés par Exhauss® (©INRS/ Dôme-Construction)	19
Figure 22. Dispositif d'assistance physique au port de charge Laevo® (©INRS).....	19
Figure 23. Dispositif d'assistance physique membres inférieurs (©INRS/ Gobio-Robot)	20
Figure 24. Dispositif de type harnais de force Corfor® (©INRS)	20
Figure 25. Illustration de la mise en œuvre d'un harnais de force (© Deledda)	21
Figure 26. Activité d'ébarbage avec meuleuses portatives (Crédits RB3D).....	22
Figure 27. Simulation de l'activité future à l'aide d'une maquette en profilés	23
Figure 28. Poste de parachèvement avec le Cobot 7 axes (©INRS/Ferry CAPITAIN).....	24
Figure 29. Positionnement du cobot lors de l'ébarbage (©INRS/FERRY CAPITAIN).....	25
Figure 30. Positionnement du cobot par rapport à la pièce à ébarber (©INRS/FERRY CAPITAIN)	25
Figure 31. Assistant de meulage pour l'ébarbage (Crédits RB3D)	27
Figure 32. Essais de l'assistance au meulage (©INRS/PTP Industry/RB3D).....	27
Figure 33. Exhauss ModèleT (©INRS/Dôme -Construction)	28
Figure 34. Démonstration de l'Exhauss modèle W (©INRS/Dôme -Construction)	29
Figure 35. Illustration de manipulation de caisse (©INRS)	30
Figure 36. Dispositifs d'assistance proposés par Exhauss® (©INRS/STUC & STAFF)	30
Figure 37. Travaux de BTP assistés par Exopush 2 (Crédits RB3D).....	31
Figure 38. Prototypage Exopush 3 (©INRS/RB3D)	31
Figure 39. Travaux de TP assistés par Exopush 4 (Crédits Colas-Sphère communication)	32
Figure 40. Travaux de TP assistés par Exopush 4 (Crédits Colas -Sphère communication) ...	32
Figure 41. Interaction Homme-Cobot [9,10].....	35

Liste des abréviations utilisées dans le document

ABB® : Fabricant majeur de robots industriels

Alfred : Robot collaboratif développé par le CEA

BTP : Bâtiment et Travaux Publics

CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

CEA-LIST : Commissariat à l'Energie Atomique –Laboratoire d'intégration des Systèmes et des Technologiques

CETIM : Centre technique des industries mécaniques

CHSCT : Comité d'Hygiène, de Sécurité et des Conditions de Travail

Cobot : « Collaborative Robot » terme utilisé pour désigner le RAPsc développé par RB3D et le CEA

Corfor® : Société de conception et de fabrication de dispositifs d'assistance physique non énergisés

DGA : Direction Générale de l'Armement

EMG : Électromyographie, enregistrement des courants électriques qui accompagnent l'activité musculaire

EXHAUSS® : dispositifs d'assistance physique non énergisés développé par une société Française

HAL : Exosquelette fonctionnant par électromyographie développé au Japon

Hercule : Exosquelette pour les membres inférieurs développé par RB3D

Kuka : Fabricant majeur de robots industriels

Mantis : Dispositif d'assistance physique non énergisé développé aux États-Unis

MRK: Société de développement de solution collaborative pour les robots Kuka

RAP : Robot d'assistance physique

RAPac : robot d'Assistance Physique à contention

RAPsc : Robot d'Assistance Physique sans contention

RB3D : Société Française de conception et de fabrication de robot d'assistance physique

QHSE : Qualité, Hygiène, Sécurité et Environnement

RPS : Risques psychosociaux

Sarcos : Exosquelette énergisé développé pour l'armée américaine

Terrena : Groupe coopératif agroalimentaire français basé à Ancenis (Loire-Atlantique)

TMS: Troubles Musculosquelettiques

TP : Travaux Publics

1. Introduction

Les développements technologiques récents, tant dans le domaine des capteurs que des nouvelles technologies et de l'électronique ont permis l'essor de la robotique collaborative et notamment des robots d'assistance physique (RAP). Ce type de robot était annoncé comme permettant d'allier la force, la robustesse et la répétabilité¹ d'un robot avec l'intelligence et les capacités d'analyse et de prise de décision d'un opérateur humain [1]. Plus récemment, pour faire face aux limites d'encombrement et d'autonomie de systèmes robotisés ou pour des raisons économiques, on constate également l'émergence de technologies d'assistance physique pour lesquels l'assistance physique est générée par un principe de restitution d'énergie mécanique (par exemple, ressorts, élastiques), il s'agit alors de dispositifs d'assistance physique (DAP) [2].

Le but annoncé de l'utilisation de ces nouvelles technologies d'assistance physique (RAP et DAP) est double. En premier lieu, améliorer les conditions de travail des opérateurs en réduisant leur charge physique de travail et des facteurs de risques biomécaniques de troubles musculo-squelettiques (TMS) [3]. En deuxième lieu, augmenter et améliorer les performances de l'opérateur et de ce fait améliorer la productivité et la compétitivité des entreprises.

L'utilisation des robots et dispositifs d'assistance physique au travail introduit cependant de nouvelles questions relatives à la santé et la sécurité. D'une part, la proximité liée à la collaboration entre le robot et l'opérateur expose ce dernier aux phénomènes dangereux classiques inhérents aux machines (mécaniques, électriques, thermiques, bruit, vibrations, etc.) qui peuvent être sources de maladies ou d'accidents du travail. D'autre part pour les RAP et les DAP, les changements apportés dans les façons de travailler que ce soit du point de vue des stratégies gestuelles ou du point de vue de l'organisation du travail peuvent être source de stress professionnel, de surcharge informationnelle, de troubles cognitifs et/ou proprioceptifs, de postures contraignantes, de contraintes physiologiques nouvelles.

Ce document a comme objectif de présenter les principaux points de vigilance liés à l'utilisation de ces robots et dispositifs d'assistance physique, dont les retours d'expérience ont pu être réalisés entre 2013 et 2016. Dans la première partie, sont rappelés la typologie, le contexte normatif attaché aux robots d'assistance physique, leurs principes de fonctionnement ainsi qu'une brève présentation du fonctionnement d'un dispositif d'assistance physique². Dans la deuxième partie, des expériences et retours de terrain sont détaillés. La dernière partie qui revient sur les aspects de santé et de sécurité au travail, soulève un certain nombre de questions et formule des conseils pour la mise en œuvre de robots et de dispositifs d'assistance physique sur le terrain. Ce travail s'inscrit dans la continuité de l'action de veille et prospective sur les RAP menée par l'INRS en 2013. Celle-ci a permis d'anticiper l'évolution de la technologie des RAP à l'horizon 2030 et d'identifier les enjeux de santé et de sécurité au travail d'une telle évolution³.

2. Contexte normatif et définitions

2.1. Les normes

La principale norme qui donne les exigences de sécurité concernant les robots industriels est la norme NF EN ISO 10218:2011. Cette norme propose deux parties : une première partie qui concerne le robot « nu » (sans outils) et une deuxième partie qui concerne le système robot, c'est-à-dire le robot complété par des équipements externes (outils, machines, axes externes...) (Figure 1. Hiérarchie des robots industriels). Néanmoins, cette norme est orientée vers les bras manipulateurs et elle ne contient que très peu de recommandations en ce qui concerne les autres types de robots industriels

¹ La répétabilité d'un robot reflète généralement la précision et la stabilité du mouvement du robot dans le temps. Il s'agit de l'erreur maximale de positionnement répété de l'outil en tout point de son espace de travail (en général répétabilité < 0.1 mm).

² A la différence des RAP, il n'existe pas à ce jour de norme qui donne les exigences de sécurité spécifiques pour les DAP.

³ RAP 2030 - Utilisation des robots d'assistance physique à l'horizon 2030, Collection : Prospectives en santé et sécurité au travail, VEP 1, novembre 2015, 259 p - <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=VEP%201>

comme les exosquelettes et les robots mobiles. Des exigences concernant ces derniers types de robots peuvent être trouvées dans des documents de norme qui concernent plus directement la famille des robots d'assistance à la personne : NF EN ISO 13482 :2014, [ISO 18646-1:2016](#). Bien que ces exigences ne s'appliquent théoriquement qu'aux robots à usage personnel, il est possible d'envisager l'utilisation de certaines caractéristiques et exigences de sécurité dans le domaine industriel.

Avec le développement des technologies liées à la robotique collaborative, le besoin en normalisation dans ce domaine s'est fait ressentir. C'est dans ce cadre qu'a été publié en 2016 un document technique : ISO TS 15066 :2016. Ce document vise à préciser les principes de sécurité à appliquer aux modes de fonctionnement collaboratifs et à accompagner l'analyse des risques qui doit être mise en œuvre.

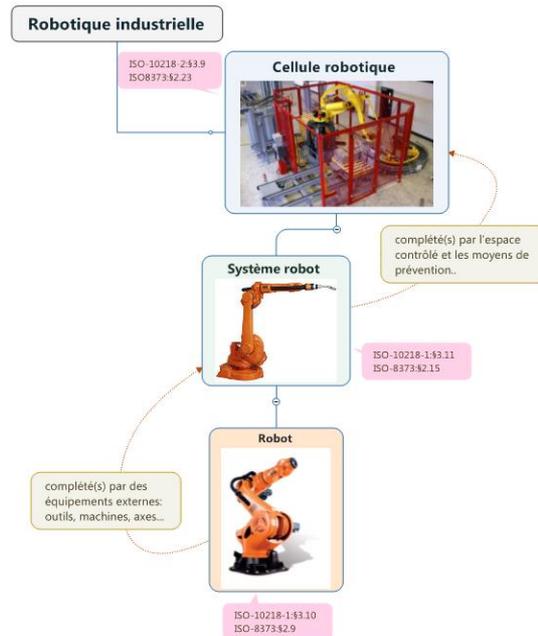


Figure 1. Hiérarchie des robots industriels

2.2. La classification

Dans la norme « NF EN ISO 13482 Robots et composants robotiques - Exigences de sécurité pour les robots de soins personnels - avril 2014 » [4], le **robot d'assistance** est défini comme un « *robot qui exécute des tâches utiles pour les personnes, ou équipement d'automatisation industrielle* ». On trouve également dans cette norme la définition d'un **robot d'assistance à la personne** : « *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* ».

Il est à noter que cette norme spécifie que l'utilisation des robots d'assistance à la personne peut impliquer des contacts physiques avec la personne pour exécuter la tâche.

Cette norme NF EN ISO 13482 classe les robots d'assistance physique dans la famille des robots d'assistance à la personne. En effet, un **robot d'assistance physique** est un « *robot d'assistance à la personne destiné à aider physiquement un utilisateur à exécuter des tâches requises en complétant ou en augmentant ses capacités personnelles* ».

Par ailleurs, en référant à la classification des robots industriels établies dans les normes EN ISO 10218-1 «Exigences de sécurité pour les robots industriels – Août 2011 » [5] et ISO 8373 «Robots et composants robotiques — Vocabulaire – Mars 2012» [6], les robots d'assistance physique font partie de la famille des robots d'assistance à la personne qui eux-mêmes sont issus des robots de services (Figure 2).

Enfin les robots d'assistance physique peuvent être classés en deux familles :

- les robots d'assistance physique sans contention (RAPsc) qui ne sont pas attachés à l'ensemble du corps. Cette catégorie de robot est souvent désignée sous le terme commercial de « Cobot » (concaténation de COLlaborative et roBOT). Ce terme est depuis repris de façon générique dans la communauté de la robotique pour définir les RAPsc.
- les robots d'assistance physique à contention (RAPac) qui sont solidaires du corps humain. Les exosquelettes appartiennent à cette catégorie de robot.

Il existe également des robots hybrides qui combinent plusieurs modes de collaboration comme Alfred (voir paragraphe 5.2)

On retrouve la description des RAPac dans la norme des robots industriels (EN ISO 10218-1) ainsi que dans la norme concernant les robots d'assistance à la personne (NF EN ISO 13482).

Les RAPsc sont décrits uniquement dans la norme concernant les robots d'assistance à la personne (NF EN ISO 13482). Il faut toutefois noter que si ces RAPsc sont utilisés au travail dans des applications d'automatisation industrielle, ils doivent également répondre aux exigences de la norme relative aux robots industriels (EN ISO 10218-1).

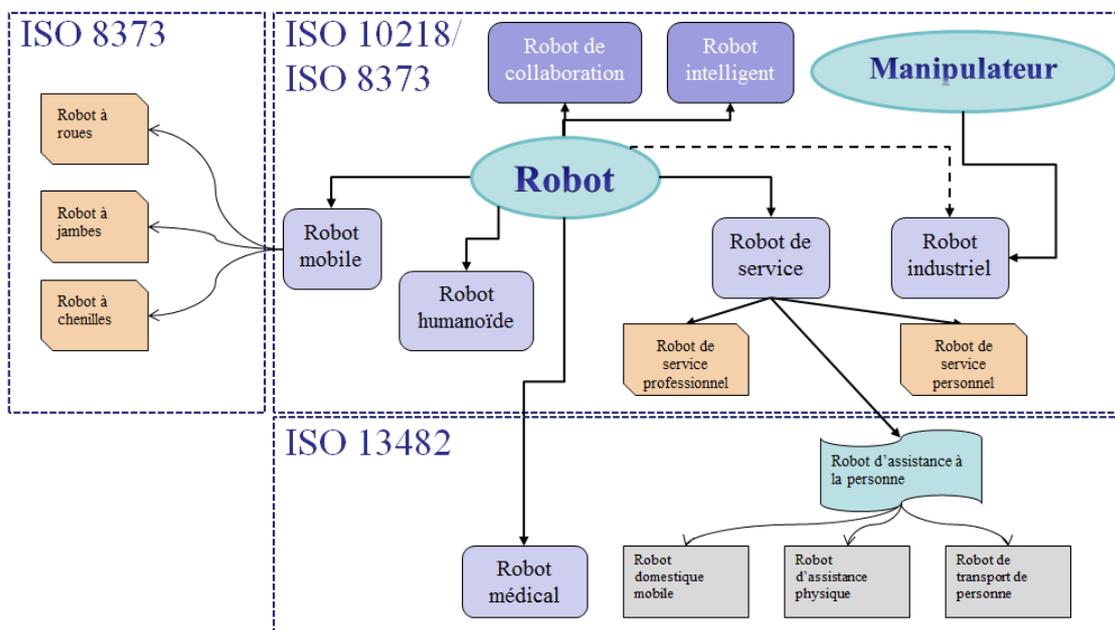


Figure 2. Classification des robots

3. Descriptions et principes des robots d'assistance physique

La différence majeure entre un RAP et un robot industriel classique est que le RAP suit le mouvement de l'opérateur en temps réel. Les mouvements d'un RAP sont donc prévisibles par l'opérateur (si on exclut les défaillances). Cette caractéristique, qui nécessite la mise en place de méthodes de commande particulières, est une spécificité technique commune aux RAPsc et RAPac.

3.1. Les RAPsc (« Cobot »)

L'utilisation d'un RAPsc implique un pilotage permanent du robot par l'opérateur. Le robot dispose pour cela d'un dispositif (capteur d'efforts par exemple) qui mesure l'intention de mouvement de l'opérateur (direction et vitesse souhaitées) et commande le robot en conséquence. La sécurité de l'opérateur est aujourd'hui assurée par la présence d'un dispositif de validation à commande maintenue et d'un arrêt d'urgence comme indiqué dans la norme EN ISO 10218-1 (Figure 3). Ce dispositif peut se présenter sous la forme d'une poignée à trois positions. Dans ce cas, seule la position médiane permet de faire fonctionner le robot. Les deux autres positions arrêtent le robot et

son outil en sécurité. Ce dispositif combiné à une vitesse limitée du robot permet de réduire le risque mécanique.

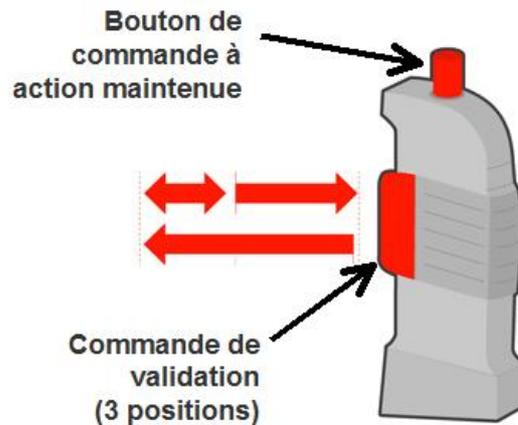


Figure 3. Poignée de validation à 3 positions (Source : Mécaprev (<https://machines-sures.inrs.fr/>))

Les concepteurs de ce cobot l'ont équipé en 2016 d'une présence main à capteur infrarouge au niveau des deux poignées de commande pour détecter la présence des deux mains (Figure 4). « La mise en fonctionnement de l'outil se fait sur le principe de la bi-commande ».

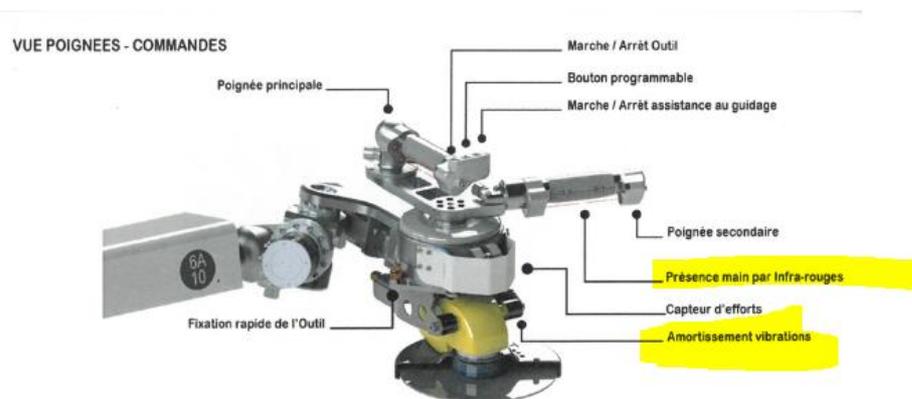


Figure 4. Poignée de commande avec présence main à capteur infrarouge (Crédits RB3D)

Il existe deux types d'utilisations possibles d'un RAPsc :

1. Compléter voire augmenter les capacités physiques de l'opérateur. Cette utilisation nécessite un robot spécifiquement conçu pour cette activité. L'une des premières applications industrielles de ce principe de collaboration est le RAPsc, développé par la société RB3D, désigné par le terme commercial « Cobot » (Figure 5). Dans ce cas, l'utilisation du « Cobot » permet de soulager l'opérateur du poids de l'outil et de réduire la transmission des vibrations. Le « Cobot » a aussi pour fonction de multiplier les efforts exercés par l'opérateur. Ce type d'application vise notamment les tâches potentiellement génératrices de TMS.



Figure 5. Le « Cobot » de RB3D (Crédits RB3D)

2. Guider un robot à la main lors de la phase d'apprentissage. Cette activité peut se faire pour des robots industriels classiques via l'utilisation d'un dispositif supplémentaire. Ces dispositifs se présentent souvent sous la forme de poignées que l'on vient fixer sur la partie terminale du robot (centre d'outil). Dans ce mode, le robot doit évoluer à une vitesse réduite. Un exemple de solution industrielle se basant sur cette technologie est, par exemple, le dispositif « *safe guiding* » développé par la société MRK qui est utilisé sur les robots de marque Kuka¹.

3.2. Les RAPac (ou exosquelette)

Le RAPac est revêtu par l'utilisateur et l'accompagne pour se mouvoir et réaliser son activité professionnelle. Le mouvement des différents axes du RAPac est initié par détection d'une intention du mouvement (mesure du courant, EMG, mesure de la force) de façon à accompagner le mouvement de l'utilisateur. Il existe trois types de RAPac : pour la partie basse du corps (Figure 6), pour la partie haute du corps (Figure 7) et pour l'ensemble du corps (Figure 8). Ces RAPac sont conçus sur la base d'une logique anthropomorphe ; c'est à dire qui se rapproche de la forme du corps humain en suivant les segments corporels qu'ils assistent.



Figure 6. Exosquelette « Hercule » (Crédits RB3D)

¹ <http://www.mrk-systeme.de/produkt/features-safeguiding>



Figure 7. Assistance physique membre supérieur (© Deledda)



Figure 8. Assistance physique corps entier (© Deledda)

On recense deux approches pour la commande des RAPac afin d'accompagner les mouvements de l'opérateur en temps réel :

La commande par capture d'effort : cette méthode consiste à détecter et mesurer l'effort exercé par l'utilisateur par des capteurs d'efforts ou via la mesure des courants issus des moteurs¹. Cette mesure est ensuite traitée pour déterminer l'intention de l'utilisateur et commander les mouvements du RAPac en conséquence. Un exemple de ce type de robot est illustré par l'exosquelette « Hercule » développé par la société RB3D en collaboration avec la DGA (Figure 6)

La commande par mesure EMG : dans ce cas, les intentions de mouvement de l'utilisateur sont détectées à travers des sondes pyroélectriques (EMG) qui mesurent le signal électrique envoyé par le cerveau aux muscles. Cette technique est essentiellement utilisée pour les RAPac de réhabilitation. Un des exemples de ce type de robot est HAL développé par l'université Tsukuba au Japon. Cette méthode de commande de mouvement peut être aussi utilisée pour les robots d'assistance physique.

Les RAPac sont destinés à deux types d'utilisation :

Le support de charge : Les premières utilisations de ce type de robots sont militaires. Elles permettent d'aider les soldats à porter leurs sacs à dos (comme dans le cas de l'exosquelette « Hercule » figure 7). Dans ce cas, il est nécessaire d'avoir un RAPac sur la partie basse du corps. Ils peuvent également équiper la partie haute du corps lorsque la charge est portée par les membres supérieurs. L'effort est alors transmis mécaniquement au sol à travers la partie basse du RAPac. Cette utilisation pourrait ouvrir des horizons pour l'utilisation des RAPac dans des domaines civils comme le BTP (Bâtiment et Travaux Publics) par exemple.

L'assistance en effort : il s'agit d'amplifier l'effort développé par l'utilisateur à travers les actionneurs du RAPac. Ces actionneurs accompagnent les mouvements de l'opérateur et amplifient ses efforts pour les activités à forte charge physique. Il convient de remarquer que la multiplication d'effort ne fonctionne que lorsque l'opérateur en a besoin.

¹ La mesure des courants issus des moteurs du robot peut être utilisée pour déterminer les efforts qui agissent au niveau de la partie terminale du robot. Il est à noter que cette méthode est moins précise que l'utilisation de capteurs d'effort et ne permet pas de détecter des efforts de faibles valeurs.

Les composantes de multiplication d'effort et de support de charge peuvent être combinées comme dans le cas de l'exosquelette « Sarcos » développé pour l'armée américaine [7].

3.3. Les dispositifs d'assistance physique

Un dispositif d'assistance physique non énergisé est, du point de vue de l'architecture, proche d'un RAPac. Les DAPac sont fixés à l'opérateur, de part et d'autre de l'articulation assistée, par un système de contention. Comme son nom l'indique, la différence fondamentale avec le RAPac est qu'il n'est pas robotisé et qu'il se base uniquement sur des éléments de restitution d'énergie mécanique pour apporter l'assistance physique. Ces éléments mécaniques peuvent se présenter sous la forme de ressorts, d'élastiques, ou d'amortisseurs pneumatiques par exemple.

On retrouve sur le marché des dispositifs non énergisés comme l'exosquelette développé par Exhaust® (pour plus de détails voir paragraphe 5.5) et les dispositifs développés par la société Corfor® (pour plus de détails voir paragraphe 5.6).

4. Acteurs majeurs du marché en France

4.1. Le CEA-Tech

Le CEA Tech est un département du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) dont l'une des missions est de contribuer à la compétitivité économique des entreprises françaises au moyen de transferts technologiques.

Au sein du CEA Tech, le laboratoire de Robotique Interactive (LRI) s'est spécialisé depuis plusieurs années dans la conception de bras de télémanipulation pour le nucléaire. En effet la manipulation de pièces radioactives nécessite de réaliser des opérations à distance afin de préserver la santé/sécurité des opérateurs.

La technologie des téléopérateurs a donné naissance à différents systèmes d'assistance aux gestes :

- Les systèmes d'assistance aux gestes dextres : Il s'agit d'un bras robotisé à retour d'effort qui permet d'augmenter la précision du geste de l'opérateur à travers des techniques de démultiplication de déplacement. Ce type de bras est surtout utilisé pour la télé chirurgie (Figure 9).



Figure 9. Système d'assistance aux gestes dextres
Crédit photo : Philippe Stroppa/CEA

- Les systèmes d'assistance aux efforts : Il s'agit d'un bras robotique (de type « cobot ») piloté par une interface de capture d'efforts. Ce type de système permet de multiplier la force exercée par l'opérateur ; il est essentiellement utilisé pour des opérations de manutention (Figure 10).



Figure 10. Système d'assistance aux efforts
(Crédit photo : Cyrille Dupont/CEA)

4.2. La société RB3D

RB3D était initialement spécialisée dans les pinces et outils énergisés. Suite à un transfert de technologie de la part du CEA-LIST¹, cette société est aujourd'hui pionnière dans le domaine des technologies robotiques d'assistance physique. Ces technologies ont permis à RB3D de développer deux produits phares : le « cobot » et l'exosquelette Hercule.

4.2.1. Le « cobot »

Le cobot de RB3D est un robot qui possède 6 degrés de liberté (6 axes) et un porte-outil sur la partie terminale. L'outil est isolé du robot par un système anti-vibratile (« silentbloc ») afin de diminuer les vibrations transmises à l'utilisateur. La commande du robot, qui est directement issue des technologies du CEA-LIST, gère à la fois la compensation de la gravité (poids de l'outillage et des bras du robot) et les mouvements du cobot suivant les intentions de l'utilisateur. Ces dernières sont définies par la mesure des efforts exercés par l'opérateur en utilisant un capteur positionné sur la poignée (« capteur d'intention » dans le jargon de RB3D). RB3D a également collaboré avec le CETIM (Centre technique des industries mécaniques) dans l'étape de l'analyse des risques.

L'une des fonctions majeures du cobot de RB3D est de multiplier l'effort de l'utilisateur. Le facteur de multiplication peut aller jusqu'à 50 fois. Cette fonctionnalité permet d'apporter une assistance physique à l'opérateur lors de l'exercice de sa tâche. Un exemple d'utilisation de ce type d'équipement concerne les opérations de meulage (Figure 11).

¹ Commissariat à l'Energie Atomique –Laboratoire d'intégration des Systèmes et des Technologies (CEA-LIST)

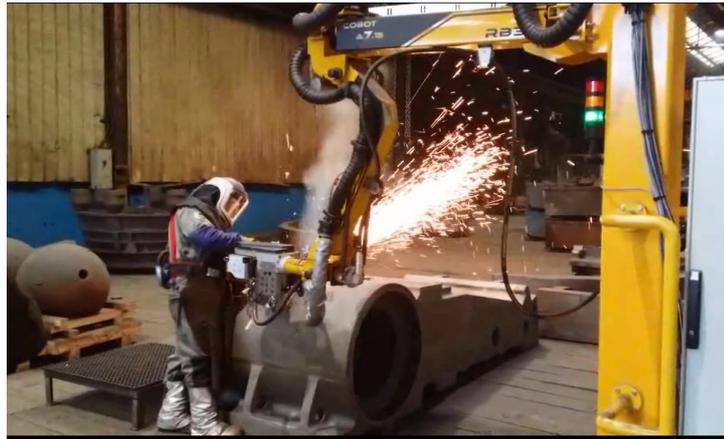


Figure 11. Cobot RB3D dans une situation de meulage (©INRS/Ferry Capitain)

4.2.2. Exosquelette Hercule de RB3D

Cet exosquelette pour la partie basse du corps, développé initialement pour l'armée de terre afin d'aider des fantassins à porter leurs sacs sur de grandes distances (Figure 12), est aujourd'hui décliné pour des applications civiles.



Figure 12. Version militaire initiale d'Hercule (Crédits RB3D)

Le principe de fonctionnement de cet exosquelette est, comme le cobot, basé sur l'évaluation de l'intention de mouvement de l'opérateur. L'estimation de cette intention est effectuée grâce à la lecture des courants moteurs (voir définition dans le paragraphe 3.2). Il est possible, ainsi, de générer la consigne des actionneurs. L'équilibre de l'exosquelette est supervisé par une centrale inertielle. Le mouvement de l'exosquelette prend en compte, non seulement, les intentions de déplacement de l'utilisateur, mais également, le maintien de son équilibre.

La version militaire de l'exosquelette Hercule pèse 25 kg et fonctionne grâce à des batteries qui lui confèrent une autonomie de 20 km. Selon RB3D, il permet à un fantassin de porter un sac pouvant aller jusqu'à 50 kg et d'évoluer à une vitesse de 4 km/h.

Dans le domaine civil, des expérimentations ont été engagées pour l'assistance au port de charge (Figure 13), pour les tireurs de bitume dans le domaine des Travaux Publics (Figure 14 et paragraphe 5.3 pour plus de détails) ainsi que pour la manutention dans les activités de stockage de matériaux destinés aux travaux publics avec un exosquelette corps entier équipé de deux bras robotisés (Figure 15).



Figure 13. Version civile d'Hercule (Crédits RB3D)



Figure 14. Exopush 1 avec bras et jambes robotisés (Crédits photos Colas)



Figure 15. Exo-Up avec bras et jambes (Crédits photos Point P)

5. Informations issues de la bibliographie et de l'étude du marché

À travers l'étude bibliographique, nous avons pu identifier d'autres dispositifs et robots d'assistance physique susceptibles d'être utilisés en milieu professionnel (dans différents secteurs d'activité). Nous n'avons pas pu observer l'utilisation de ces dispositifs et robots. Néanmoins, ce paragraphe présente ces dispositifs et permet de compléter les constats issus du terrain.

5.1. RAPsc « Sarrazin technologies »

Ce robot de type cobot a été réalisé par la société Sarrazin technologies en collaboration avec le CEA. Il s'agit d'un manipulateur à compensation de masse, modifié afin d'en contraindre les mouvements : l'équilibrage mécanique permet à la charge fixée à l'extrémité du robot de paraître comme en apesanteur par rapport à l'opérateur (Figure 16). Les déplacements de la charge dans l'espace sont contraints par des moteurs qui simulent des murs virtuels. Ce mode de fonctionnement permet par exemple de guider l'opérateur pour des tâches d'insertion de pièces.



Figure 16. Manipulateur à compensation de masse de la société Sarrazin technologies.
Crédit photo : Philippe Stroppa/CEA

5.2. Le robot collaboratif du CEA Tech

Le CEA Tech a développé un nouveau concept de robot collaboratif industriel. Ce robot qui se présente sous la forme d'un bras est considéré comme le « troisième bras » de l'opérateur. Il est prévu de l'utiliser comme aide à la manipulation d'objets (Figure 17). Ce robot est aujourd'hui commercialisé par la start-up ISYBOT.



Figure 17. Robot collaboratif ISYBOT
(Crédit photo : Francis Rhodes/CEA & ISYBOT)

Le principe de ce robot est basé sur des actionneurs hautement réversibles par vis à bille et câbles (Figure 18). Ce principe de fonctionnement garantit un faible frottement et permet la lecture précise des courants moteurs. La lecture des courants fonctionne comme des capteurs d'efforts et permet à l'opérateur de guider le robot à la main (comme pour un cobot). Cette spécificité permet également de détecter les contacts avec l'opérateur et d'arrêter le robot en cas de contact. Dans ce cas, le robot fonctionne en mode de collaboration dit par « limitation d'effort et de puissance » comme décrit dans la norme EN ISO 10218-1 de 2011 [5].

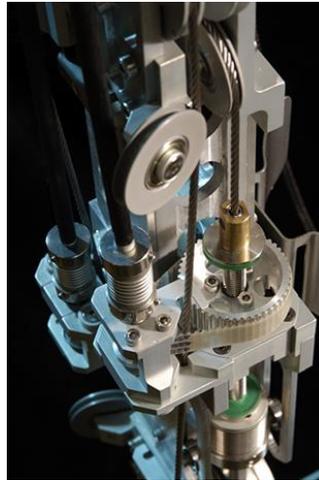


Figure 18. Actionneur hautement réversible
(Crédit photo : Philippe Stroppa/CEA)

5.3. Le prototype d'exosquelette pour l'entreprise de BTP Colas

La société Colas, entreprise de travaux publics, est la première entreprise à avoir procédé à une mise en œuvre (civile) de l'exosquelette Hercule de RB3D (Figure 19) pour l'assistance physique des membres supérieurs. La première version prototype de cet exosquelette a été testée sur un chantier de travaux publics (Figure 20). Il était composé d'une structure robotisée pour assister les membres inférieurs lors des déplacements permettant également un appui pour le maniement du racloir à bitume. Il comportait aussi un dispositif de capture d'effort pour évaluer les efforts engagés par l'opérateur au niveau des membres supérieurs pour ratisser l'enrobé afin de définir le niveau d'assistance nécessaire.



Figure 19. Utilisation de l'exosquelette Hercule par Colas (Crédits photos Colas)

À l'issue du visionnage des tests initiaux de l'exosquelette, à partir des films de promotion de l'entreprise Colas disponibles sur internet et d'un échange lors de la journée nationale concours robotique avec la responsable de projet exosquelettes chez RB3D, deux constats ont été faits :

- Les déplacements sur un sol instable avec Hercule semblent peu naturels et perturbants pour l'opérateur.
- Lors des phases de ratisage, on peut identifier des risques pour le maintien de l'équilibre de l'opérateur.

- La gestion de l'équilibre d'ensemble lors des phases de déplacements, la fluidité de déplacements et le ratissage du bitume sont encore à améliorer



Figure 20. Travaux de BTP assistés par Hercule (Crédits photos Colas)

5.4. Le dispositif MANTIS® (LockHead Martin)

L'exosquelette Mantis a été développé par l'US Navy pour des activités de ponçage. Il s'agit d'une structure non énergisée constituée d'un harnais qui s'appuie sur le bassin, soutenue par une structure métallique le long des membres inférieurs qui est en contact avec le sol au niveau des pieds. Les efforts sont transmis par la structure de l'exosquelette au sol. Un système d'assistance au port de charge (au port de l'outil) est fixé au niveau de la ceinture. Il fonctionne suivant une logique de stabilisateurs qui assistent l'opérateur. Ce dispositif propose une aide à la réalisation de l'effort ou de maintien de la charge. Cet exosquelette est également doté d'un contrepoids réglable pour permettre à l'opérateur de maintenir un équilibre de l'ensemble du corps satisfaisant pour réaliser son activité.

<http://www.lockheedmartin.com/us/products/exoskeleton/industrial.html>

5.5. Le dispositif EXHAUSS®

Les exosquelettes Exhauss® sont fabriqués par la société L'AIGLE®. Cette entreprise, seul fabricant français de stabilisateurs de caméras, conçoit et fabrique depuis 2003 des bras et harnais pour soulager des opérateurs de cinéma et de télévision des charges de plusieurs dizaines de kilos qu'ils manipulent (Figure 21). L'extension de ce savoir-faire à des domaines nécessitant le portage et la manutention de charges et d'outils s'est concrétisée en 2010. La société détient plusieurs brevets pour les stabilisateurs L'AIGLE®, et plusieurs autres spécifiquement destinés aux techniques ou technologies des exosquelettes de la marque Exhauss. http://www.exhauss.com/fr_exhauss.htm

Lors de nos premières observations sur le terrain nous avons assisté à plusieurs démonstrations par des concepteurs au sein d'entreprises intéressées par ce type d'assistance physique.



Figure 21. Différents dispositifs d'assistance proposés par Exhauss® (©INRS/ Dôme-Construction)

Pour compléter son offre de dispositifs d'assistance en France, la société Gobio Robot qui distribue des produits Exhauss® a mis à son catalogue un dispositif d'assistance au port de charge (aide au redressement du buste) de la marque Laevo®. Ce système permet de limiter les efforts de la musculature postérieure lors du maintien de la posture buste en avant et l'aide à l'extension du buste pour soulever une charge (Figure 22). Il est développé aux Pays-Bas et des sociétés spécialisées en intégration de système d'assistance physique innovant le distribuent et l'intègrent en entreprise. Ces sociétés interviennent auprès des entreprises selon trois modalités :

- Intégration de dispositifs existants sans modifications
- Intégration de dispositifs en les adaptant au milieu auquel ils sont destinés
- Intégration de dispositifs conçus avec l'entreprise et un concepteur



Figure 22. Dispositif d'assistance physique au port de charge Laevo® (©INRS)

Plus récemment, la société Gobio-Robot a présenté l'EXO IP14 Chair® Chairless, un exosquelette pour les membres inférieurs qui permet aux utilisateurs de se déplacer et maintenir des positions d'assises (Figure 23)



Figure 23. Dispositif d'assistance physique membres inférieurs (©INRS/ Gobio-Robot)

5.6. Dispositif CORFOR®

Ce dispositif de type « harnais de force » est commercialisé par la société SIDECT: Société d'innovation et de développement d'équipement de confort au travail (Figure 24). Cette société est née de l'association d'Yves Labbe-Laine l'inventeur du dispositif et d'Oscar Fernandez, le président de la société. Leur intention était de réduire la charge physique de travail d'activités reconnues comme traumatisantes pour le dos et les lombaires.

<http://www.corfor.fr/>



Figure 24. Dispositif de type harnais de force Corfor® (©INRS)

SIDECT présente le système Corfor® comme un équipement destiné « à réduire les risques de TMS en particulier au niveau des lombaires et des bras ». Ce dispositif est constitué d'un harnais auquel sont accrochées des bretelles élastiques s'étendant dans le dos de l'utilisateur jusqu'aux jambes où elles sont fixées. Ainsi, selon SIDECT, « l'utilisateur est placé dans la bonne posture pour réaliser ses activités de manutention » (Figure 25). L'équipement (ou harnais de force) est protégé par plusieurs brevets et la marque CORFOR® est déposée. (<http://corfor.fr/>)



Figure 25. Illustration de la mise en œuvre d'un harnais de force (© Deledda)

5.7. Le dispositif SuitX®

La startup californienne SuitX® propose également un exosquelette destiné au monde du travail. Il s'agit d'une structure non robotisée qui est modulable. Elle peut ainsi être configurée en fonction des besoins d'assistance physique. L'exosquelette est conçu sur une logique de transfert d'une partie de la charge vers le sol via les membres inférieurs.

<http://www.suitx.com/max-modular-agile-exoskeleton>

6. Retours d'expérience du terrain

6.1. Les Rap sans contention

6.1.1. Entreprise de rechappage, recreusage et réparation de Pneus

Ce site est le premier à avoir bénéficié de l'installation d'un robot d'assistance physique sans contention en France. Il s'agit du cobot 6 axes de RB3D. Cette société a fait appel à la Carsat dont elle relève pour réduire la charge physique de travail au poste de broissage de pneus en bénéficiant d'une aide financière pour la mise en œuvre d'une technologie innovante.

Le poste de broissage de pneu, dans la chaîne de rechappage comporte, en effet, des opérations à fortes contraintes physiques. Ce poste consiste à éliminer les défauts sur un pneu usagé (généralement des pneus de semi-remorques) grâce à une brosse pneumatique. La brosse peut peser plus de 15 kilos, et l'opérateur doit exercer des efforts importants pour obtenir un broissage efficace. Dans le but de soulager l'opérateur du poids de l'outil et afin de démultiplier ses efforts, Pneu Laurent a donc fait appel à RB3D pour intégrer un cobot au poste de travail.

Deux arguments ont été avancés par l'entreprise pour justifier l'utilisation d'un cobot au poste de broissage :

- Faciliter la réinsertion professionnelle des opérateurs souffrants de TMS, en retour d'arrêt maladie.
- Avoir la possibilité de féminiser ce poste de travail.

Les constats suivants ont été faits par les intervenants sur le site de l'entreprise :

- Afin de lever les difficultés liées à l'utilisation de la poignée à trois positions, qui provoquait des arrêts intempestifs, l'entreprise a remplacé la poignée d'origine (élément central de la sécurité du cobot) par une poignée classique à une seule position. A priori, aucune analyse des risques n'a été réalisée suite à cette modification.
- Le cobot observé comporte un système amortisseur (« silentblock ») qui découple plus ou moins les vibrations. Ce système introduit un léger mouvement entre l'outil et le cobot et rend plus difficile la gestion de son effort par l'opérateur. Par ailleurs, on observe que la multiplication de l'effort introduite par le cobot contribue à réduire la plage de cet effort : l'opérateur qui exerçait un effort de 5 N pour réaliser sa tâche sans cobot, n'exerce plus qu'un effort de 1 N avec le cobot muni d'un facteur multiplicateur de 5 fois. Paradoxalement, alors

que la plage d'effort des opérateurs est divisée par 5, ceux-ci éprouvent des difficultés à doser leurs efforts.

- Il a été constaté que la stratégie développée par les opérateurs pour compenser la diminution du retour d'effort est de concentrer leurs regards sur les déplacements de la brosse par rapport au cobot. Cette nouvelle stratégie pourrait à terme contribuer à accroître la charge perceptive.

6.1.2. Fonderie réalisant de la conception, de l'usinage et de l'assemblage de pièces métalliques

Cette entreprise s'est spécialisée dans la conception et la fabrication de pièces métalliques de grande taille pour des marchés divers comme la cimenterie, l'aéronautique, l'énergie, la sidérurgie.

Elle a fait appel au fabricant de robots d'assistance physique RB3D afin d'équiper ses postes de parachèvement et de pose de pavés. Les motivations avancées pour l'implantation de robots d'assistance physique au parachèvement sont :

- de maintenir en activité les opérateurs experts atteints de TMS de l'appareil locomoteur
- de faciliter l'embauche de « jeunes » sur ces postes réputés très pénibles.

Toute l'entreprise s'est mobilisée sur ce projet de déploiement du cobot RB3D pour l'ébarbage de pièces métalliques (Figure 26). Le projet est piloté par le responsable QHSE de l'entreprise.



Figure 26. Activité d'ébarbage avec meuleuses portatives (Crédits RB3D)

L'INRS est intervenu en appui de la Carsat dont relève l'entreprise et a pu ainsi suivre le projet tout au long de sa réalisation.

Plusieurs visites et de nombreux échanges avec les acteurs du projet dans l'entreprise et le préventeur de la Carsat ont permis de comprendre le processus d'implantation du cobot et d'identifier les problématiques santé-sécurité associées.

Audit ergonomique et maquettage (1^e visite)

L'accompagnement de l'entreprise par la société RB3D repose sur une étape préalable de maquettage pour simuler l'utilisation du futur cobot. La maquette utilisée pour les tests était composée d'un ensemble de profilés en aluminium assemblés par des articulations. La mise en œuvre de la maquette¹ échelle 1 (Figure 27) a permis de valider, les hypothèses d'atteinte des zones de travail avec le cobot, identifiées à partir d'une simulation numérique

¹ Terminologie RB3D pour désigner un prototype en profilé d'aluminium sans moteurs



Figure 27. Simulation de l'activité future à l'aide d'une maquette en profilés aluminium échelle 1 (Crédits Ferry Capitain)

Deux ébarbeurs et un chef de chantier de l'entreprise concernée ont été impliqués dans cette étape de maquettage. L'opération a été réalisée sous le regard de l'auditeur de RB3D et du responsable QHSE de l'entreprise. Les ébarbeurs étaient invités à donner leur avis sur l'utilisabilité¹ du cobot en vérifiant qu'ils étaient capables d'effectuer les différentes opérations de meulage réalisées habituellement sans l'utilisation du cobot.

Cette approche était centrée sur une logique de détermination des zones d'atteintes en fonction des pratiques des ébarbeurs.

Les constats sur cette étape sont les suivants :

La méthodologie d'implantation proposée par RB3D, qualifiée d'« audit ergonomique », prend en compte une partie de l'expertise des opérateurs pour adapter le cobot aux exigences de la situation d'ébarbage. Cependant, cette approche privilégie la dimension posture et positionnement de l'ébarbeur par rapport au bloc à ébarber au détriment des dimensions organisationnelles et psychosociales (notamment les exigences attentionnelles) qui ne sont pas pris en compte lors de la simulation de l'activité. Par ailleurs, la variabilité des stratégies gestuelles (prise de l'outil, orientation de la meule, déplacements, équilibre...) et les marges de manœuvres disponibles pour les ébarbeurs ne font pas l'objet d'un traitement spécifique.

De même, il n'est pas tenu compte des composantes organisationnelles des situations telles que la durée de travail ininterrompu, le nombre et la durée des pauses, l'impact éventuel de ces éléments sur le collectif de travail, l'évolution de l'affectation des salariés selon leurs compétences et leurs aptitudes fonctionnelles, etc. Ce constat est paradoxal car l'une des motivations de l'entreprise pour implanter le cobot était d'améliorer les conditions de travail à l'ébarbage. L'évolution de la production (quantité produite, qualité de l'ébarbage) reste à analyser et à évaluer par l'entreprise en situation réelle.

Suivi de l'implantation du cobot (2^e visite à 6 mois)

Cette deuxième visite, 6 mois après la mise en service du cobot (Figure 28), correspondait à la période d'apprentissage du fonctionnement du cobot préconisée par RB3D.

L'opération de meulage assistée par cobot est apparue moins rapide que le meulage manuel. D'après l'entreprise, cette opération nécessite, à peu près 20% de temps de travail supplémentaire. Cette augmentation est acceptable du point de vue de l'entreprise si elle s'accompagne d'une réduction de la charge physique de travail (dans l'optique d'une réduction des TMS à long terme). Ce constat

¹ Le RAP rend le service attendu de manière la plus facile, avec une mise en œuvre aisée, en tenant compte des caractéristiques de l'opérateur

devait toutefois être confirmé après le réglage final du cobot et la consolidation de la phase d'apprentissage.

D'un point de vue technique, le cobot était fonctionnel, mais toujours en phase de réglage : en effet, le système de commande présentait encore des arrêts intempestifs. Dans certains cas, un simple redémarrage de la baie de commande par l'entreprise permettait la remise en service du cobot. Les difficultés rencontrées par les opérateurs ont été remontées à RB3D par le responsable du projet de l'entreprise. Le personnel de RB3D s'est déplacé sur le terrain (une à deux fois par semaine) ou a procédé à des modifications de certains paramètres à distance.

La manière dont sont interprétées les doléances des opérateurs d'ébarbage par le responsable du secteur, la traduction qu'il peut en faire à RB3D et l'interprétation par les personnes de RB3D, posent la question de la validité et de la fiabilité des ajustements ou réglages proposés à distance.

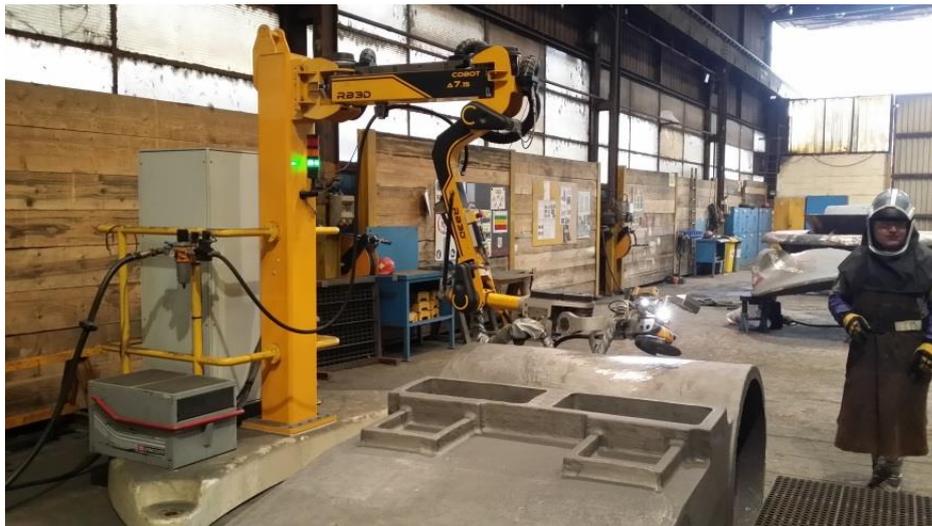


Figure 28. Poste de parachèvement avec le Cobot 7 axes (©INRS/Ferry CAPITAIN)

Différents constats ont pu être faits lors de cette deuxième visite :

Les opérateurs ont attiré notre attention sur le maintien de la poignée de validation en position médiane en indiquant que ce geste était contraignant sur de longues durées. D'autre part, ils ont constaté que la sensibilité de la gâchette de cette poignée entraînait de nombreux arrêts du cobot. Les modifications apportées par RB3D ont eu pour effet d'augmenter le temps de réponse de la fonction d'arrêt qui est ainsi passé de 40 ms à 400 ms. Ce retard programmé a permis d'éliminer une partie importante des arrêts intempestifs, mais pourrait se révéler préjudiciable à la sécurité. Ces modifications techniques (temps de réponse d'appui sur la poignée de validation, modifications du système de commande...) n'ont pas donné lieu à une nouvelle analyse des risques.

En raison de l'espace occupé par le cobot, les ébarbeurs ont rencontré également des difficultés pour conserver les stratégies de contrôle de leur activité utilisées auparavant. En effet, la réduction des degrés de liberté de mouvement liée à l'utilisation du cobot limite la latitude posturale des opérateurs qui doivent donc trouver de nouvelles stratégies de positionnement et de mouvement pour réaliser leur travail, notamment en mobilisant un peu plus les sens de la vision et de l'ouïe pour assurer le contrôle de la qualité du travail et maintenir leur performance (Figure 29) Les opérateurs ont également signalé leur difficulté à meuler à l'arrière et latéralement par rapport à la pièce, le paramétrage initial du cobot ne permettant pas de donner la priorité à un axe par rapport à un autre en fonction du sens du meulage. Une modification a donc été réalisée par RB3D afin de permettre à l'opérateur de sélectionner un seul axe pour le meulage quand la tâche le nécessite. Une commande a été ajoutée afin de contraindre les mouvements des autres axes du cobot et de faciliter les opérations de meulage linéaire. Néanmoins, l'équilibre de l'ensemble du corps de l'ébarbeur a semblé perturbé lors de la mise en action de cette fonction du cobot.

Dans ces conditions, l'augmentation des contraintes perceptives des ébarbeurs se pose comme une composante à part entière de la future situation d'ébarbage. Au moment de notre visite, l'entreprise n'avait pas identifié cette conséquence sur la prise d'information visuelle.

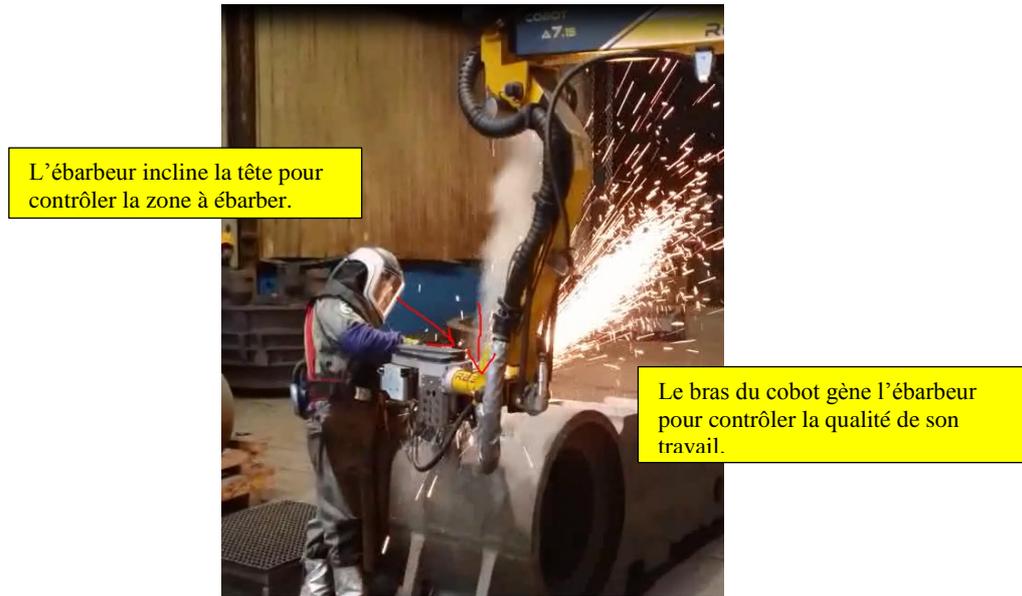


Figure 29. Positionnement du cobot lors de l'ébarbage (©INRS/FERRY CAPITAIN)

L'intégration d'un cobot dans une situation de travail nécessite de mener une phase d'identification et un suivi des changements apportés par ce nouvel outil sur l'activité de travail, en considérant à la fois les dimensions techniques, organisationnelles et humaines.

3^e visite à 8 mois Une troisième visite de cette installation a permis de compléter les constats précédents.



Figure 30. Positionnement du cobot par rapport à la pièce à ébarber (©INRS/FERRY CAPITAIN)

Le cobot ainsi que l'armoire de commande intégrée avaient été installés sur un socle (Figure 30). L'ensemble était positionné face aux pièces à ébarber et pouvait être déplacé en fonction des zones à atteindre lors des phases d'ébarbage.

Lors de cette visite, les ébarbeurs ont indiqué qu'ils n'utilisaient pas systématiquement le cobot, mais qu'ils ressentaient moins de fatigue lors de sa mise en œuvre. Ils ont cité spontanément l'impact positif sur les membres supérieurs et le dos.

Dans le but d'inciter les opérateurs à utiliser systématiquement le cobot afin de diminuer la fatigue ressentie, l'entreprise avait installé un dispositif de comptabilisation du temps d'engagement journalier du cobot dans l'armoire électronique de commande du cobot.

Les principaux constats faits après 3 mois d'utilisation du cobot en production dans l'entreprise concernent les moyens mis en œuvre par l'entreprise pour prendre en compte et interpréter les doléances des ébarbeurs, puis y apporter des solutions. Plusieurs niveaux ont été identifiés dans la chaîne de remontée des problèmes :

1. de l'opérateur vers son encadrement intermédiaire : l'opérateur remonte les problèmes qu'il rencontre à son responsable.
2. de l'encadrement intermédiaire au responsable du projet cobot de l'entreprise : Le responsable d'atelier informe le responsable du projet des problèmes rencontrés par l'opérateur.
3. du responsable projet cobot au régleur de RB3D : Le responsable de projet contacte le régleur RB3D afin de lui soumettre les problèmes techniques rencontrés (ce contact peut s'effectuer à distance : téléphone ou mail).
4. du régleur de RB3D au cobot : le régleur RB3D opère des modifications sur le cobot afin de résoudre les problèmes soumis par le responsable de projet (dans le cas où un déplacement n'est pas nécessaire, ces modifications peuvent se faire à distance).

On peut supposer qu'à chaque niveau d'interprétation du problème, des pertes ou des réinterprétations d'informations se produisent, ce qui amène à s'interroger sur la pertinence et/ou la fiabilité du paramétrage à distance du cobot et sur les multiples interprétations possibles introduites par la multiplication d'interlocuteurs.

4^e visite à 1 an

Lors de la quatrième visite, et sur la base d'un entretien avec le responsable QHSE de l'entreprise, nous avons fait les constats suivants :

L'entreprise avait procédé à des arbitrages concernant les évolutions techniques du cobot et les caractéristiques des meuleuses utilisées (orientation et position de la poignée, libération de certains degrés de liberté du cobot, modifications de certaines vitesses d'acquisitions...).

Selon les zones à atteindre, le cobot pouvait désormais être équipé d'une meuleuse d'angle ou d'une meuleuse, lui donnant plus de choix d'adaptation d'outils.

La baisse de 30% des performances d'ébarbage, constatée après 6 mois d'utilisation, avait été résolue en permettant aux opérateurs de gérer le temps d'utilisation de la meuleuse assistée, leur accordant ainsi une marge de manœuvre. L'analyse des temps d'engagement du cobot et les résultats en termes de qualité ont ainsi permis à l'entreprise de valider une amplitude horaire d'utilisation du cobot variant de 50 à 80 heures par semaine à la discrétion des ébarbeurs pour terminer une pièce.

L'entreprise a décidé de tester le cobot sur un autre site dans une autre région. Sur ce site, les retours ont été plutôt négatifs et ont été attribués par l'entreprise au fait que les opérateurs de cet autre site n'avaient pas participé à la co-conception et aux phases d'implantation du cobot.

6.1.2.1. Version légère d'assistance au meulage robotisée

L'entreprise RB3D a développé une version légère d'assistance au meulage (6 axes) destiné à l'ébarbage. Nous avons pu assister à des tests avec cette nouvelle version en situation réelle de travail. L'assistant au meulage et sa centrale de commande sont positionnés sur un chariot mobile (Figure 31). Cette configuration permet de le déplacer au plus près de la situation de travail, de le repositionner en fonction des tâches à effectuer et également de l'utiliser sur plusieurs postes de travail en faisant participer plusieurs ébarbeurs.



Figure 31. Assistant de meulage pour l'ébarbage (Crédits RB3D)

Durant la phase de test en situation réelle, le technicien nous a indiqué que cette version de robot d'assistance physique était dotée de niveaux d'assistance physique et d'assistance au guidage variables. L'ébarbeur, seul ou en concertation avec le technicien, peut mobiliser, en fonction de ses besoins, six niveaux d'assistance. Cette innovation permettrait de graduer l'assistance physique au cours des phases d'appropriation du « mini-cobot » (Figure 32) mais également lors de la production en fonction des tâches à réaliser.



Figure 32. Essais de l'assistance au meulage (©INRS/PTP Industry/RB3D)

6.1.3. Groupe Holvia Porc

Dans le cadre de la réalisation d'un diagnostic de charge physique réalisé avec l'aide de la Carsat dont relève cette entreprise, des situations à risque ont été identifiées sur certains postes. Les mesures organisationnelles telles que la polyvalence et la rotation aux postes, visant à limiter l'exposition des opérateurs aux contraintes physiques, avaient atteint leurs limites puisque, sur certains postes à contraintes physiques très élevées, la rotation pouvait se faire toutes les 20 minutes. C'est pourquoi, des solutions techniques visant à limiter, voire à supprimer ces contraintes étaient recherchées.

C'est dans ce cadre qu'une expérimentation était en cours afin de diminuer les contraintes physiques imposées par une tâche d'enlèvement des pannes¹ de porc. Cette opération impose l'intervention d'un opérateur et ne peut être automatisée.

En collaboration avec le CEA Tech, l'utilisation d'un robot collaboratif de type "cobot" ou d'un "exosquelette" a été envisagée afin d'aider les opérateurs dans la réalisation de cette tâche et d'obtenir une situation de travail acceptable en termes de contraintes physiques.

¹ La panne est un morceau adipeux (gras) chez le porc, il est situé au niveau des vertèbres lombaires et enveloppe les reins et le haut des intestins. Cette graisse, très goûteuse et très fine, entre dans la composition des pâtés, rillettes et terrines car elle a la particularité de se mélanger très facilement avec la viande maigre.

Un groupe pilote a été mis en place par l'entreprise pour suivre ce projet. Ce groupe était composé de :

- 2 opérateurs de production
- 1 membre du CHSCT
- 1 responsable de la qualité
- 1 responsable de la maintenance

L'INRS a pu assister à la réunion de lancement de ce projet à la demande de la Carsat. Il était prévu que cette réunion préliminaire soit suivie par des assistances sur le terrain.

L'entreprise a dédié une aile complète de son atelier à l'installation d'une ligne expérimentale afin de mettre au point avec le CEA Tech le futur outil cobotique destiné à l'enlèvement de la panne. Cet outil sera, a priori, basé sur une approche hybride entre robot d'assistance physique sans contention (cobot) et robot autonome puisque, seule l'opération de prise de la panne nécessite un savoir-faire. De ce fait, cette opération sera réalisée en « mode cobot ». L'opérateur guidera le robot jusqu'à la prise de la panne, tandis que l'opération d'enlèvement de la panne (contraignante physiquement) sera effectuée par le robot d'une manière autonome, puisqu'elle ne nécessite aucun savoir-faire.

6.2. Les exosquelettes à contention

6.2.1. Entreprise de maçonnerie

Une entreprise de maçonnerie comptant 32 personnes a souhaité tester des exosquelettes de la marque Exhauss®, à la suite de plusieurs déclarations de TMS en maladie professionnelle et d'un cas d'inaptitude pour des problèmes dorsolombaires. Elle a sollicité un avis de la Carsat dont elle dépend qui a proposé que l'INRS suive la phase de test. Lors de notre visite, un représentant de l'entreprise Exhauss a fait la démonstration de 3 types d'exosquelettes (Lifter, Transporter et Worker).

Les constats présentés ci-dessous sont issus de l'observation des phases de test et du recueil du ressenti en temps réel des opérateurs.

Modèle LIFTER (L)

L'exosquelette Modèle L présente une potence simple ou une potence à treuil avec une commande électronique. Ce modèle présenté par l'agent commercial d'Exhauss® n'a pas été testé par les opérateurs.

Modèle TRANSPORTER (T)

L'exosquelette modèle T (Figure 33) présente un seul bras au bout duquel se monte une collection de préhenseurs adaptés à chaque poste, ici un perforateur.



Figure 33. Exhauss ModèleT (©INRS/Dôme -Construction)

L'opérateur qui a testé cet équipement a indiqué qu'il avait :

- l'impression « d'avoir les jambes lourdes, de s'enfoncer dans le sol », et que le harnais lui faisait mal au dos,
- des difficultés à trouver son équilibre et en particulier à positionner son bassin et ses pieds. La position des mains ne lui semblait pas correspondre à sa façon habituelle de travailler

Au final, il n'envisageait pas l'utilisation de ce dispositif technique dans le cadre de son activité de travail.

Modèle WORKER (W)

L'exosquelette modèle W (Figure 34) présente des soutiens pour les membres supérieurs actionnés par un système de « tendeurs » réglables à l'aide d'un dispositif de vissage. Cette mise en tension permet d'ajuster l'aide apportée par l'exosquelette à l'opérateur pour la manutention de sa charge.



Figure 34. Démonstration de l'Exhaus modèle W (©INRS/Dôme -Construction)

Le système, qui soulage les membres supérieurs, laisse peser des contraintes sur le système main-poignet (prise en pince, maintien du poignet), le dos et les membres inférieurs.

La projection du centre de gravité de l'opérateur vers l'avant l'oblige à rajuster constamment son équilibre postural, à partir de nouveaux repères, en fonction des mouvements réalisés.

Selon le commercial Exhaus®, « l'exosquelette modèle W présentera prochainement des bras à capacité de charge réglable électroniquement à volonté ».

6.2.2. Exemple dans la maintenance nucléaire

Le groupe Areva NP, qui réalise la maintenance des centrales nucléaires, a mené en collaboration avec l'INRS une campagne d'essais d'exosquelettes entre janvier et juin 2016 avec huit testeurs. Les principaux résultats ont montré une perception de l'effort physique réduite avec l'utilisation de l'exosquelette, des douleurs lombaires moins intenses. Des mesures physiques comparatives (fréquence cardiaque, électromyogramme, tests d'équilibre...) ont été réalisées lors de tâches codifiées sur un parcours défini, avec ou sans l'exosquelette. Les résultats des tests montrent un changement de stratégie gestuelle lors de la manutention manuelle avec le port de l'exosquelette et un coût cardiaque accru. En revanche, lorsque les opérateurs ont la possibilité de manutentionner les caisses à leur rythme (Figure 35), il a été constaté que la fréquence cardiaque était stabilisée avec l'exosquelette mais avec un temps de réalisation de la tâche plus élevé d'environ 30% [8].



Figure 35. Illustration de manipulation de caisse (©INRS)

6.2.3. Entreprise de plâtrerie

Les évolutions du dispositif Exhaus®

En complément des exosquelettes disponibles sur « étagère » qui ne répondent pas toujours aux besoins très spécifiques d'assistance physique en situation réelle de travail, nous avons pu constater une volonté des concepteurs, des intégrateurs et des entreprises de co-développer des exosquelettes sur-mesure

C'est le cas de la Société Stuc & Staff et du concepteur Exhaus qui ont modifié un exosquelette pour l'adapter aux activités de ponçage de plafond (Figure 36) dans le cadre d'une démarche de prévention des TMS lancée en 2013. L'objectif était de soulager les opérateurs exerçant une activité de travail qui consistait à travailler avec une ponceuse les bras en l'air plusieurs heures d'affilées voire sur des journées complètes. Cette activité est identifiée comme étant particulièrement à risque pour les TMS de l'épaule. Depuis 2013 (date du déploiement), l'utilisation du dispositif est perçue très favorablement par les opérateurs qui éprouvent moins d'efforts, moins de fatigue au niveau des membres supérieurs.



Figure 36. Dispositifs d'assistance proposés par Exhaus® (©INRS/STUC & STAFF)

6.2.4. Evolution de l'exosquelette pour le tirage de bitume

Les derniers modèles d'exosquelettes destinés aux tireurs de bitume ont évolué en deux temps. La version Exopush 1 a supprimé le concept de structure anthropomorphe¹ pour les membres inférieurs (Figure 37). Ce modèle est désormais constitué d'un harnais maintenant en équilibre l'assistance robotisée des membres supérieurs en appui sur un bipied². Cette configuration transmet, via des axes métalliques le long des membres inférieurs, les efforts vers le sol par des semelles métalliques. Par conséquent, les contraintes sont ainsi transférées en partie vers le sol par la partie inférieure de l'exosquelette. Ce modèle est une architecture hybride qui combine les principes d'un dispositif d'assistance physique pour le transfert des forces des membres supérieurs vers le sol et d'un robot d'assistance physique pour accompagner les efforts nécessaires au tirage du bitume.



Figure 37. Travaux de BTP assistés par Exopush 2 (Crédits RB3D)

A la suite de nombreux tests en situation réelle de travail et à l'analyse des ressentis des opérateurs, les concepteurs ont introduit le principe de découplage de l'assistance physique pour améliorer la maniabilité du râteau dans la version Exopush 3. Ainsi, les opérateurs tirent le bitume en développant des stratégies gestuelles qui seraient moins dépendantes de l'assistance robotisée. Ce modèle Exopush 3 permet le transfert d'une partie des contraintes vers le sol à travers un seul axe métallique fixé à la chaussure de sécurité (Figure 38)



Figure 38. Prototype Exopush 3 (©INRS/RB3D)

¹ Qui a la forme d'un corps humain.

² Un bipied est un dispositif de soutien similaire à un trépied ou un monopode, mais avec deux jambes. Il procure une amélioration significative de la stabilité sur deux axes de mouvement.

La dernière amélioration proposée pour « Exopush 4 » a consisté à réduire le poids de l'assistance robotisée mais également à la déporter encore plus à l'arrière pour qu'à chaque phase du tirage du bitume elle soit située en arrière de l'opérateur (Figure 39 et Figure 40). Ce prototype est susceptible d'évoluer encore.



Figure 39. Travaux de TP assistés par Exopush 4 (Crédits Colas-Sphère communication)



Figure 40. Travaux de TP assistés par Exopush 4 (Crédits Colas -Sphère communication)

6.3. Synthèse des constats recueillis sur le terrain

Les interventions en entreprises ont permis de dégager des constats communs sur les motivations des entreprises à acquérir un RAP et les problèmes récurrents identifiés sur le terrain à la suite de l'implantation de RAP.

Parmi les motivations énoncées par les entreprises pour l'implantation de RAP, nous avons identifié les plus répandues qui concernent la réduction des risques liés à l'activité physique :

- Réduire les vibrations
- Réduire les efforts
- Réduire le port de charge

Elles concernent également les préoccupations relatives au maintien au travail et à son accessibilité facilitée pour tous :

- Maintenir la performance de l'opérateur sur l'ensemble de sa carrière
- Faciliter la réinsertion professionnelle des opérateurs souffrant de TMS, au retour d'un arrêt maladie
- Maintenir en activité les opérateurs experts atteints de TMS
- Avoir la possibilité de féminiser le poste de travail
- Faciliter l'embauche de « jeunes » sur des postes réputés très pénibles.

Les problèmes récurrents identifiés sur le terrain sont principalement envisagés du point de vue du travail (sa nature, son contenu, son organisation, etc.) et des interactions Homme-RAP, et du point de vue des acteurs impliqués dans l'implantation.

S'agissant du travail, les exemples suivants illustrent les difficultés rencontrées, d'ordre physique, physiologique, organisationnel et cognitif :

- Au plan physique, L'emprise au sol du RAP induit un encombrement qui influe sur les espaces d'évolution de l'opérateur.
- Sur le plan physiologique, les dispositifs de commande des RAP (par exemple les poignées) peuvent contribuer à l'augmentation des sollicitations du système main-bras. Des difficultés à doser les efforts pour réaliser la tâche peuvent apparaître en raison du facteur multiplicateur du cobot. La nécessité de maintenir un effort pour rester en position de « repos » ou lors des phases d'attente (par exemple lors de l'utilisation du système Exhaus) a un effet sur les séquences de contraction-relâchement des groupes musculaires qui peut être préjudiciable pour la santé des opérateurs..
- Sur le plan cognitif, les modifications de la tâche induites par l'implantation d'un RAP font évoluer les stratégies de prise d'information visuelle pour contrôler la qualité du travail et sont susceptibles d'accroître la charge perceptive en intensité et durée.
- Du point de vue organisationnel, certaines composantes telles que le temps nécessaire à l'appropriation des nouveaux dispositifs, la répartition des tâches au sein de l'équipe de travail, l'impact de l'utilisation des nouveaux dispositifs non seulement sur le travail réel de l'utilisateur mais aussi sur celui de ses collègues (redistribution de tâches, gestion des aléas, évolution des régulations collectives, etc) sont rarement anticipés.

Ainsi, une méthodologie d'implantation de ces dispositifs qui privilégie les dimensions « posture et positionnement » des opérateurs, sans prendre en compte les exigences attentionnelles ou les dimensions organisationnelles et psychosociales du travail, risque de ne pas être efficace. De même, la non prise en compte des questions relatives à la variabilité des stratégies gestuelles (prise de l'outil, orientation de l'outil, déplacements, équilibre du corps entier...) et aux marges de manœuvres disponibles pour les opérateurs risque de compromettre l'implantation dans des conditions optimales pour la santé et la sécurité des opérateurs.

Du point de vue des acteurs, les observations montrent que tous les acteurs concernés ne sont pas forcément mobilisés d'emblée. Or, l'implantation de ces dispositifs en entreprise nécessite vraisemblablement l'association de compétences multiples (techniques, organisationnelles et humaines), et requiert en particulier la participation des opérateurs à toutes les étapes du projet. Les modalités de circulation des informations (retours d'expérience, remontées de problèmes à régler) dans la phase d'implantation doivent être définies de façon à éviter toute déperdition/interprétation erronée au risque sinon d'apporter des réponses inappropriées aux problèmes constatés.

7. Enjeux pour la santé et la sécurité au travail

7.1. Questions et points de vigilance pour les RAPsc

Les expériences de terrain menées par l'INRS en ce qui concerne les RAPsc sont essentiellement issues d'assistances et d'observations auprès des industriels. Les questions liées aux risques d'accidents et à la charge physique émanent directement de l'observation de phénomènes dangereux sur le terrain (une liste non exhaustive des phénomènes dangereux se trouve en Annexe A) et permettent d'identifier des points de vigilance pour la mise en œuvre des RAPsc. Les questions liées à la charge mentale nécessitent, quant à elles, des analyses plus approfondies.

7.1.1. Risques d'accident du travail

Il est important de rappeler que les RAPsc entrent dans le champ d'application de la directive « Machines » 2006/42/CE. Ils doivent donc satisfaire aux exigences essentielles de santé et de sécurité qui leur sont applicables. La norme NF EN ISO 10218 donne également des exigences de sécurité en ce qui concerne les RAPsc. Les éléments centraux de sécurité d'un RAPsc donnés par

cette norme sont essentiellement l'utilisation d'un dispositif de validation à commande maintenue et une vitesse réduite.

Lors des observations sur le terrain, les questions suivantes ont été soulevées :

- Le maintien de la poignée de validation en position intermédiaire sur de longues durées s'avère être contraignant car cette position mobilise de manière importante la main et l'avant-bras, ce qui augmente significativement les sollicitations statiques du membre supérieur.
- La mise en œuvre des RAPsc dans une situation de travail est susceptible de générer des risques de collision du robot avec un opérateur se trouvant à proximité. L'analyse des risques doit donc prendre en compte la configuration spécifique de la situation de travail et, dans le cas d'un risque avéré de collision des moyens de protection complémentaires doivent être mis en œuvre.

Si des changements de configuration du cobot sont réalisés pour améliorer son fonctionnement et son adaptation à la tâche à effectuer, il faut être vigilant aux modifications de ces paramètres. Ce type de modification pourrait avoir un impact néfaste sur le niveau de sécurité du cobot. Ainsi une modification du réglage du facteur multiplicateur d'effort du cobot peut provoquer des risques de rupture mécanique (éclatement de disques de meules par exemple).

Recommandations :

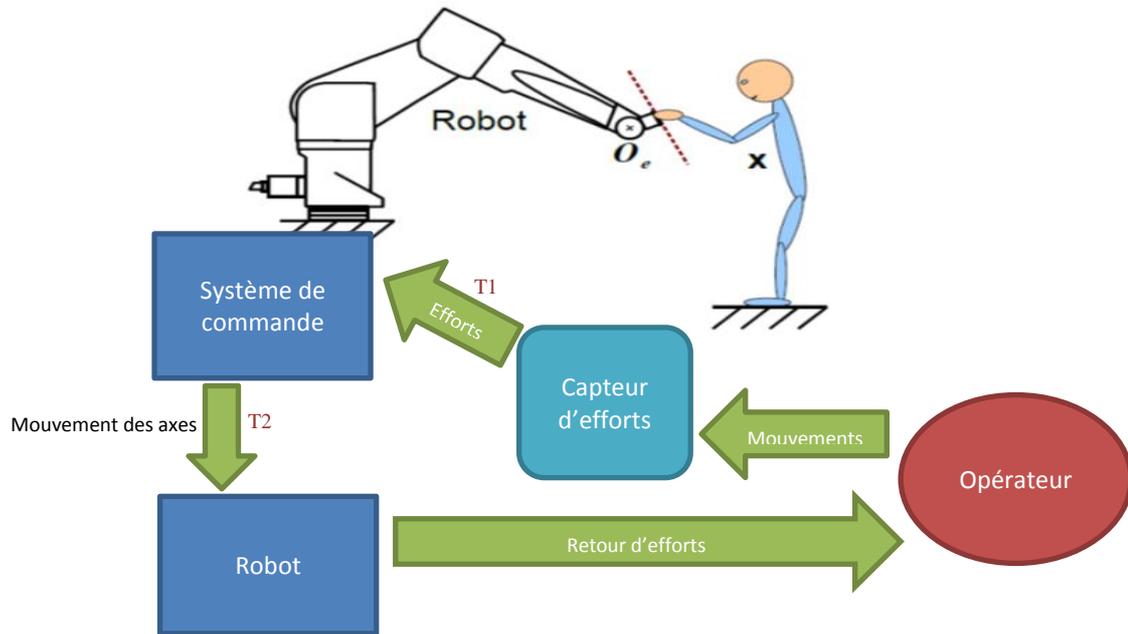
Chaque installation de RAPsc doit faire l'objet d'une analyse des risques spécifiques à la situation de travail afin de proposer des solutions de prévention adaptées. Il est également impératif de faire une nouvelle analyse des risques après chaque modification du cobot et de son outillage ou de son paramétrage. L'approche « actuelle » de réduction de risque mise en œuvre par les préventeurs institutionnels et d'entreprises permet de prendre en compte les risques (mécaniques, électriques, thermiques, risques d'explosion...) décrits dans les parties 1 et 2 de la norme NF EN ISO 10218. Des recommandations y sont faites en ce qui concerne les risques.

7.1.2. Risques en lien avec la charge physique

Au-delà des facteurs biomécaniques (efforts physiques, travail répétitif, postures contraignantes, etc.) et individuels des troubles musculo-squelettiques (TMS), les facteurs organisationnels et psychosociaux du travail contribuent aussi à la genèse de diverses lésions musculo-squelettiques chez les travailleurs. Or, lors de l'intégration d'un RAPsc au travail, cette origine multifactorielle des TMS ainsi que les modifications induites par l'introduction de ce RAP sur l'organisation du travail sont généralement peu prises en compte.

Par exemple, utiliser un RAPsc pour le travail équivaut à introduire une interface entre les mouvements de l'opérateur et l'outil. En effet, lorsque l'opérateur exerce des efforts (consigne) ceux-ci sont mesurés par le capteur de forces pour être ensuite traduits en mouvement par le cobot (Figure 41) [15]). Lors de nos visites d'observation, nous avons soulevé les points suivants :

- Selon les performances de l'algorithme de commande, un laps de temps plus ou moins important peut s'écouler entre l'ordre de mouvement donné par l'opérateur et le mouvement réel.
- Les frottements au niveau des articulations du robot peuvent diminuer la fluidité des mouvements de l'opérateur. Cette altération de la fluidité du mouvement de l'opérateur nécessite, en général, un réapprentissage du geste technique voir une reconstruction globale des stratégies gestuelles pour l'opérateur.



T1 : Temps de réponse du système de commande pour la lecture des efforts
T2 : Temps de réponse du robot pour réaliser le mouvement souhaité

Figure 41. Interaction Homme-Cobot [9,10]

L'utilisation d'un RAPsc pour réduire le poids et les vibrations de l'outil pourrait, dans un objectif de productivité accrue, amener certains employeurs à augmenter les cadences et à réduire les temps de repos nécessaires à l'opérateur.

Identifier et prendre en compte ces aspects nécessite de mobiliser les compétences de l'intégrateur, de l'entreprise utilisatrice, des préventeurs, en faisant participer les utilisateurs, tout au long des phases d'utilisation et de test du robot sur le terrain. Dans le même ordre d'idée, la variabilité des stratégies gestuelles (prise de l'outil, orientation de la meule, déplacements...) et la reconstruction de stratégies pour « maîtriser son travail » (gestion de l'équilibre, changement de la nature des informations disponibles, contrôle de son travail, marges de manœuvre, marges temporelles...) ne sont pas toujours identifiées, ni prises en charge par les différents intervenants du projet d'intégration d'un RAP et par l'entreprise.

Recommandations :

L'utilisation d'un RAPsc a pour objectif de réduire la charge physique induite par l'outil. Or utiliser un RAPsc peut générer d'autres effets (contraintes de mouvements, modification du geste, modification de l'organisation du travail...) qu'il est nécessaire d'identifier et de prendre en compte afin de ne pas introduire de nouveaux risques en tentant d'en supprimer certains.

La norme NF EN ISO 10218-1 [5,11] identifie un certain nombre de phénomènes dangereux liés à l'absence de prise en compte des recommandations ergonomiques, mais ne donne pas de recommandations particulières quant à la prise en compte des risques liés à ces phénomènes dangereux. Lors de l'analyse des risques, il convient donc de tenir compte des caractéristiques du RAPsc (temps de latence entre la commande et le mouvement du bras, limitations articulaires, etc.) qui peuvent avoir des conséquences sur la charge physique de l'opérateur. L'analyse des risques doit également intégrer les changements de stratégie de mouvement de l'opérateur et leurs possibles répercussions sur la charge physique.

7.1.3. Risques psychologiques en lien avec l'interaction homme robot

Plus difficiles à appréhender, les risques psychologiques liés à l'usage de robots collaboratifs, sont encore peu connus par manque de recul et d'études. Les points de vigilance concernant ces risques liés à l'interaction homme robot sont extrapolés des résultats de l'action de prospective, de la bibliographie, des connaissances dans ce domaine, mais aussi de nos observations.

Il ressort de cet état des lieux que l'utilisation d'un RAPsc change la façon de travailler des opérateurs car elle implique une réduction de leurs degrés de liberté de mouvements. Contraints par les limitations de l'espace de travail du cobot, les opérateurs ne peuvent plus adopter les postures et positions qu'ils déployaient habituellement [12]. Leurs modes opératoires pour réaliser le travail sont donc modifiés. Il a été observé également que l'opérateur ne pouvait plus utiliser le retour d'effort qu'il maîtrisait auparavant comme moyen de contrôler son travail et qu'il devait compenser par d'autres stratégies et modes opératoires, comme des stratégies visuelles différentes.

On peut faire l'hypothèse que les changements introduits dans l'organisation du travail par l'utilisation d'un RAP, une augmentation de la cadence et la réduction des temps de pause pourraient mener à des risques psychologiques liés à l'interaction homme-robot, tels qu'un sentiment de dépendance, de perte d'autonomie et d'identité. Une intensification de la charge mentale, une augmentation des exigences pesant sur les délais, la quantité, la qualité de la production liées à l'introduction d'un RAP sont également des facteurs de risque psychologique. C'est la raison principale pour laquelle l'utilisation d'un RAPsc par un opérateur rend impérative une période d'apprentissage de durée variable selon le poste de travail.

Des questions se posent également quant à l'acceptation de l'utilisation d'un RAPsc [13] [14]. Nos observations de terrain et les commentaires des opérateurs rencontrés montrent que la population la plus âgée a du mal à accepter l'utilisation d'un cobot au travail. Ce constat reste néanmoins à vérifier dans d'autres entreprises et pour d'autres types de RAPsc.

Recommandations :

L'entreprise doit anticiper les différentes modifications apportées au travail des opérateurs. Une attention particulière doit être portée aux risques d'augmentation de cadence et à la diminution des temps de pause qui peuvent générer une augmentation de la charge mentale et conduire à l'apparition de risques psychosociaux (RPS). Par ailleurs, les retentissements éventuels sur l'expertise des opérateurs (perte de savoir-faire, modifications de l'expertise...) doivent faire l'objet d'une vigilance accrue. S'il y a des changements dans l'organisation du travail, le processus doit être considéré dans sa globalité. Ces changements doivent être pris en compte au moment de l'analyse des risques.

7.2. Questions et point de vigilance RAPac et dispositifs d'assistance physique non énergisés

En ce qui concerne les RAPac, seules les observations de démonstrations commerciales sur le terrain ont pu être exploitées. Ce type de robots représente un projet d'investissement important pour les entreprises et ils existent encore un certains nombres de freins technologiques qui limitent fortement leurs utilisations. L'un des freins technologiques majeur identifié est l'autonomie limitée des batteries. Néanmoins, les retours d'information des industriels et du réseau prévention semblent indiquer qu'il existe un réel besoin en ce qui concerne les RAPac. Cette demande pourra être satisfaite dans le futur à condition que soient levés les principaux freins technologiques.

Parallèlement, l'utilisation des dispositifs d'assistance physique non énergisés voit un développement exponentiel du fait d'un coût d'achat accessible pour des entreprises de toutes tailles. Des observations de terrain ont pu avoir lieu pour l'utilisation de plusieurs modèles de dispositifs d'assistance physique non énergisés en situation réelle de travail.

7.2.1. Risques d'accident du travail

Seuls les RAPac énergisés [15] présentent des risques spécifiques aux machines (risques mécaniques, électriques, thermiques...). Les dispositifs d'assistance physique non énergisés, bien qu'ils puissent également engendrer des risques mécaniques, ne sont pas considérés comme des

machines. Les recommandations proposées pour l'analyse des risques spécifiques à chaque cas d'utilisation préconisé pour les RAPsc sont également valides pour les RAPac.

Le risque mécanique (collision, coincement, cisaillement...) est présent lors de l'utilisation des RAPac (exosquelette) et RAPsc (cobot) au travail. Néanmoins la puissance des actionneurs des RAPsc qui est généralement supérieure à celle des RAPac peut générer des dommages plus importants en cas d'accident. En ce qui concerne les RAPac, les risques de chute et de perte d'équilibre sont particulièrement présents du fait que l'opérateur est attaché au robot.

Parmi les risques identifiés lors des observations sur le terrain, on peut citer :

- le risque de dépassement des limites articulaires des membres de l'opérateur, puisque le RAPac est attaché au corps de l'opérateur,
- de possibles risques thermiques liés au contact direct entre la structure du RAPac et le corps de l'opérateur,
- un risque de collision avec les opérateurs qui travaillent à proximité d'un opérateur équipé d'un exosquelette peut également être envisagé.

Recommandations :

Tout comme les RAPsc, la mise en œuvre d'un RAPac doit être précédé d'une analyse des risques spécifiques.

Il est primordial de respecter les limites de mobilisation de l'ensemble de segments corporels impliqués dans les mouvements avec un exosquelette, en mettant en place une limitation d'axe fiable (de préférence mécanique)

Si les actionneurs (moteurs) de l'exosquelette sont susceptibles de dégager une chaleur importante, il est nécessaire de prévoir une isolation entre l'exosquelette et le corps de l'opérateur.

7.2.2. Risques en lien avec la charge physique de travail

Les risques identifiés lors de l'utilisation d'un exosquelette et d'un dispositif d'assistance physique non énergisé sont assez semblables. En effet, ces deux équipements ont les mêmes architectures et remplissent le même rôle d'assistance physique.

Les risques liés à l'utilisation de ces équipements seraient pour partie liés à une possible standardisation du geste, à une éventuelle fonte musculaire¹ ou à l'inverse, une sur-sollicitation locale (force, amplitudes articulaires, répétitivité, travail statique) et un déplacement des contraintes sur d'autres zones du corps (du membre supérieur vers le dos, des membres inférieurs vers le dos, des doigts vers l'avant-bras...). Il faut aussi noter les retentissements possibles liés aux efforts statiques qu'il est difficile de décrire à ce stade. Des risques liés à la perturbation du mouvement sont également à prendre en compte : modification de la répartition des masses et de l'inertie de l'opérateur, risques de trouble de l'équilibre donc de chute dans le cas de d'exosquelettes et risques de perturbations de la proprioception en temps réel ou après l'utilisation d'un exosquelette. Les zones de pression localisées liées au port d'un RAP doivent également être analysées.

7.2.3. Risques psychologiques en lien avec l'interaction homme robot

En ce qui concerne des retentissements possibles en lien avec l'intensification du travail, on peut citer la complexité induite par l'utilisation des RAP qui peut augmenter la charge mentale et entraîner une plus grande exigence attentionnelle. Ces phénomènes peuvent être encore accrus en cas de dysfonctionnements ou de nécessité de gérer des aléas de production.

L'interdépendance homme-robot peut également constituer un facteur de risques psychosociaux, surtout si l'organisation du travail conduit à mettre, d'une façon ou d'une autre, l'homme sous la dépendance ou en concurrence avec lui et induire ainsi un sentiment de perte de contrôle sur son travail.

¹ Cette hypothèse d'un éventuel risque de fonte musculaire fait référence aux effets que peut avoir, par exemple l'immobilisation d'un membre par plâtre ou un autre type d'orthèse, ou d'un séjour en microgravité spatiale.

8. Perspectives

Compte-tenu du faible nombre d'études menées sur les RAP et les DAP ainsi que du manque de repères scientifiques concernant leur apport en termes d'assistance au travail, l'évaluation de leur mise en œuvre doit s'appuyer sur l'acquisition de nouvelles connaissances. Les expériences de terrain réalisées entre 2013 et 2016 présentées dans ce document soulèvent des questions non encore résolues. Elles permettent néanmoins d'énoncer des points de vigilance relatifs à la conception, l'installation et l'utilisation de ces équipements en faveur de la santé et la sécurité au travail. Ces éléments sont repris dans le dossier web de l'INRS intitulé : Nouvelles technologies d'assistance physique (robots et exosquelettes)¹. Par ailleurs, un programme d'études et recherches a démarré à l'INRS de façon à objectiver les intérêts et limites de ces nouvelles technologies d'assistance physique. Il alimentera au fur et à mesure des résultats obtenus, les connaissances dans ce domaine, à des fins d'évaluation, de normalisation et de prévention.

¹ <http://www.inrs.fr/risques/nouvelles-technologies-assistance-physique/ce-qu-il-faut-retenir.html>

Bibliographie

- [1] SALMI T., MARSTIO I., MALM T., LAINE E. - Man-Robot Cooperation — New Technologies and New Solutions. In: Micro-Assembly Technologies and Applications. Springer US. 2008, pp. 385-394.
- [2] BOSCH T., VAN ECK J., KNITEL K., DE LOOZE M. - The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Appl Ergon*, 2016, 54, pp. 212-7.
- [3] PESHKIN M., COLGATE J.E. - Cobots. *Industrial Robot: An International Journal*, 1999, 26, 5, pp. 335-341.
- [4] NF EN ISO 13482 - Robots et composants robotiques - Exigences de sécurité - Robots non médicaux pour les soins personnels. Paris, AFNOR, 2014, 102 p.
- [5] NF EN ISO 10218-1 - Exigences de sécurité pour les robots industriels - Robots et dispositifs robotiques - Partie 1 : Robots. Paris, AFNOR, 2011, 45 p.
- [6] SGHAIER A., CHARPENTIER P. - Robotique et prévention des AT-MP: Étude d'instruction. France, INRS.
<http://www.inrs.fr/accueil/recherche/etudes-publications-communications/doc/etude.html?refINRS=A.5%2F2.051>
- [7] BOGUE R. - Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments. *Industrial Robot: An International Journal*, 2009, 36, 5, pp. 421-427.
- [8] THEUREL J., DESBROSSES K., ROUX T., SAVESCU A. - Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Applied Ergonomics*, 2018, 67, Supplement C, pp. 211-217.
- [9] LAMY X. - Conception d'une Interface de Pilotage d'un Cobot, UNIVERSITÉ PIERRE & MARIE CURIE, 2011p.
- [10] ATAIN-KOUADIO J.-J., SGHAIER A., PICOT D. - Robots d'assistance physique: fonctionnement et modes d'utilisation en industrie. In: 50^{ème} Congrès de la SELF, Paris. 2015, pp. 560-567.
- [11] NF EN ISO 10218-2 - Exigences de sécurité pour les robots industriels - Robots et dispositifs robotiques - Partie 2 : Système robot et intégration. Paris, AFNOR, 2011, 79 p.
- [12] MAURICE P., MEASSON Y., PADOIS V., BIDAUD P. - Assessment of physical exposure to musculoskeletal risks in collaborative robotics using dynamic simulation. 19th CISM-IFTtoMM Symposium on Robot Design, Dynamics, and Control-RoManSy, 2012p.
- [13] LASOTA P.A., SHAH J.A. - Analyzing the Effects of Human-Aware Motion Planning on Close-Proximity Human–Robot Collaboration. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 2015, 57, 1, pp. 21-33.
- [14] ARAI T., KATO R., FUJITA M. - Assessment of operator stress induced by robot collaboration in assembly. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2010, 59, 1, pp. 5-8.
- [15] LEE H., KIM W., HAN J., HAN C. - The technical trend of the exoskeleton robot system for human power assistance. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13, 8, pp. 1491-1497.

Annexe A: Liste des phénomènes dangereux

Phénomènes dangereux des RAPsc

Type	Conséquences possibles
Phénomènes dangereux mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> - Écrasement - Cisaillement - Coupure ou sectionnement - Happement - Entraînement ou emprisonnement - Choc - Perforation ou piqûre - Friction, abrasion - Injection ou fuite de fluide/gaz à haute pression
Phénomènes dangereux électriques	<ul style="list-style-type: none"> - Électrocution - Choc - Brûlure - Projection de particules en fusion
Phénomènes dangereux thermiques	<ul style="list-style-type: none"> - Brûlure (chaude ou froide) - Lésion produite par rayonnement
Phénomènes dangereux engendrés par le bruit	<ul style="list-style-type: none"> - Perte de l'audition - Perte de l'équilibre - Perte de la perception, désorientation - Toute autre conséquence (par exemple mécanique) par suite des conditions ambiantes ou de la distraction
Phénomènes dangereux engendrés par les vibrations	<ul style="list-style-type: none"> - Fatigue - Dommages neurobiologiques - Désordres vasculaires - Choc
Phénomènes dangereux engendrés par les radiations	<ul style="list-style-type: none"> - Brûlure - Dommage aux yeux et sur la peau - Maladies correspondantes
Phénomènes dangereux engendrés par des matériaux et des produits	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilisation - Feu - Brûlure chimique - Maladies due à l'inhalation
Phénomènes dangereux engendrés par le non-respect des principes ergonomiques	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvaises postures ou effort excessif (contrainte répétitive) - Fatigue
Phénomènes dangereux associés à l'environnement dans lequel le robot est utilisé	<ul style="list-style-type: none"> - Brûlures - Décès ou maladie - Glissement, chute - Dommages respiratoires - Choc
Combinaisons de phénomènes dangereux	<ul style="list-style-type: none"> - Toute autre conséquence par suite des combinaisons des phénomènes dangereux et situations dangereuses

Phénomènes dangereux des RAPac

	Type	Conséquences possibles
	Phénomènes dangereux mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> - Écrasement - Coupure - Sectionnement - Perforation - Abrasion - Pincement - Lésions d'impact - Collision - Emprisonnement - Injection ou fuite de fluide/gaz à haute pression - Chute
	Phénomènes dangereux électriques	<ul style="list-style-type: none"> - Incendie, décharge de fumées ou substances dangereuses - Choc électrique - Brûlure
	Phénomènes dangereux thermiques	<ul style="list-style-type: none"> - Brûlure - Stress - Gêne - Engelures
	Phénomènes dangereux engendrés par le bruit	<ul style="list-style-type: none"> - Perte auditive - Stress - Gêne - Perte d'équilibre - Perte de conscience
	Phénomènes dangereux engendrés par les vibrations	<ul style="list-style-type: none"> - Tendinite, lombalgie, gêne, névrose, arthrite, cinétose, et autres lésions relatives aux vibrations
	Phénomènes dangereux engendrés par les rayonnements (non ionisant/ionisants)	<ul style="list-style-type: none"> - Brûlures - Lésions oculaires - Effets dangereux sur des implants/dispositifs médicaux - Syndrome d'irradiation, effets sur la fertilité, mutation
	Phénomènes dangereux engendrés par le contact continu avec le robot	<ul style="list-style-type: none"> - Brûlures - Irritation - Sensibilisation
	Phénomènes dangereux engendrés par des matériaux et des produits	<ul style="list-style-type: none"> - Brûlures - Irritation - Asphyxie - Aveuglement
	Phénomènes dangereux liés au stress, à la posture et à l'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> - Troubles musculosquelettiques - Fatigue - Déchirure ou inflammation musculaire - Posture corporelle contraignante, fatigue de l'opérateur, lésion/trouble musculaire - Réaction lente de l'utilisateur dans des situations dangereuses -
	Combinaisons de phénomènes dangereux	<ul style="list-style-type: none"> - Toute autre conséquence par suite des combinaisons des phénomènes dangereux et situations dangereuses

Annexe B

Références bibliographiques

Demandeur : Veille RAP

Assistance traitée par : Département EVAD le : 23/01/2015

RAP

Références bibliographiques

Les références sélectionnées sont extraites de la base de données INRS-Biblio disponible gratuitement sur le site internet de l'INRS : www.inrs.fr et sur CDROM (informations au 01 40 44 30 00)

BRASSEUR G.

Robots d'assistance physique. L'opérateur n'est plus seul face à sa tâche.

Travail et sécurité, n° 746, janvier 2014, pp. 26-27, ill.

Les solutions proposées par la robotique en matière d'assistance physique au poste de travail se multiplient. Dans l'usine de demain, des équipements robotisés pourront accompagner le travailleur dans son activité. Mais quelle incidence aura l'introduction de ces technologies sur la santé et la sécurité des opérateurs ? Définition précisée de la notion " robot d'assistance physique ".

Références INRS : 00085418 -

MISSALA T.

Paradigms and safety requirements for a new generation of workplace equipment.

(Paradigmes et exigences de sécurité pour une nouvelle génération d'équipement de travail).

International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, Pologne, vol. 20, n° 2, 2014, pp. 249-256, ill., bibliogr. (En anglais)

Un espace de travail dans l'industrie manufacturière ne consiste plus seulement en des équipements stationnaires (machines, robots fixes, etc.), mais aussi en des équipements mobiles (véhicules automatisés, robots mobiles, etc.) qui travaillent et interagissent directement avec les salariés. Les équipements de travail doivent pas seulement être sécurisés, ils doivent également ne pas être source de peur ou d'anxiété et devraient même inspirer calme et confiance. Cet article présente des exemples de coopération robot - être humain et propose une sélection de nouvelles exigences de sécurité pour assurer ce paradigme. L'article présente également des exemples d'actions qui peuvent faire de l'espace de travail un environnement convivial pour l'homme.

Références INRS : 00085820 -

Quelle place pour les robots d'assistance physique en 2030 ?

Paris, 3 décembre 2013.

Congrès CC 5.

Hygiène et sécurité du travail, n° 235, 2e trimestre 2014, pp. 64-68, ill., bibliogr.

Le premier exercice de prospective piloté par l'INRS était consacré à l'utilisation des robots d'assistance physique (RAP) à l'horizon 2030. Différents scénarios, de la " rapophilie " à la " rapophobie ", ont été construits, en fonction de contextes politique, économique et social différents. Avec pour objectif d'imaginer des futurs possibles pour l'utilisation de ces robots dans le monde du travail.

Références INRS : 00086005 -

SYLLA N. ; BONNET V. ; COLLEDANI F. ; FRAISSE P.

Ergonomic contribution of ABLE exoskeleton in automotive industry.

(Apport ergonomique de l'exosquelette ABLE dans l'industrie automobile).

International Journal of Industrial Ergonomics , Pays-Bas, vol. 44, n° 4, juillet 2014, pp. 475-481, ill., bibliogr. (En anglais)

Chez le constructeur automobile français PSA Peugeot Citroën, les opérations de précision continuent à être réalisées manuellement sur les chaînes de montage, provoquant des douleurs, voire des troubles musculosquelettiques (TMS) au niveau des membres supérieurs des opérateurs. Afin de réduire la douleur ressentie par les ouvriers au cours de cette activité, tout en assurant la qualité de la production, un exosquelette ABLE appliqué au membre supérieur a été utilisé chez 8 sujets, qui ont exécuté des opérations de vissage dans des conditions expérimentales. Cet exosquelette a été développé en France, par le Commissariat à l'énergie atomique (CEA). Les angles des articulations, les torsions, les forces de réaction au sol et la durée des opérations ont été mesurées, puis analysés pour déterminer les performances de ce dispositif dont la fonction est d'alléger la charge au niveau du bras. Les résultats de l'expérience montrent une nette réduction des torsions au niveau des articulations et plaident en faveur de l'utilisation généralisée de l'exosquelette ABLE sur les chaînes de montage dans l'industrie automobile.

Références INRS : 00086785 -

ACOULON S.

Les robots collaboratifs. Guide de l'intégration de la santé et de la sécurité.

Réédition.

Les ouvrages du CETIM. Environnement, sécurité, réglementation. 3C77.

Centre technique des industries mécaniques (CETIM, 52 avenue Félix Louat, cs 80067, 60304 Senlis Cedex), 2014, 97 p., ill.

La robotique collaborative devrait voir son utilisation s'étendre dans les années à venir. Même si dans certains cas, elle représente un potentiel très intéressant de réduction des contraintes physiques au travail, toutes les conséquences n'ont pas été évaluées et des risques nouveaux apparaissent. Ces technologies récentes ne sont, en outre, pas complètement industrialisées et éprouvées. De fait, chaque intégration d'un robot conçu pour une application collaborative est unique et chaque situation de travail ainsi créée nécessite une évaluation spécifique des risques. En effet, ces technologies prometteuses, tout à la fois en gain de productivité et de réduction des contraintes pour le salarié sont complexes. Ce guide a pour but d'accompagner le concepteur ou l'intégrateur d'un îlot robotisé en lui donnant le contexte réglementaire et normatif, les différentes applications collaboratives existantes, la démarche à entreprendre pour mener ce projet.

Références INRS : 00086957 -

DESCHAMPS P.

Dossier. Les métiers du plâtre : en quête de bonnes pratiques.

Prévention BTP, n° 169, octobre 2013, pp. 14-19, ill.

Ce dossier présente les bonnes pratiques et les solutions innovantes développées dans les métiers du plâtre. Les plâtriers et les plaquistes sont exposés aux risques liés à la manutention, aux approvisionnements des matériaux et aux postures de travail contraignantes. Pour les limiter, les entreprises organisent des formations aux techniques gestuelles et posturales et proposent des équipements d'aide à la manutention (camion-grues, lève-plaques, chariots, etc.). Le port des EPI, l'utilisation des équipements réduisant les vibrations et la rotation des équipes de travail sont préconisés. Des pistes (meilleure préparation physique, respect des règles d'hygiène, etc.) sont proposées. Il existe des exosquelettes pour la réalisation des tâches les plus pénibles comme le grésage. Ce dossier comprend également l'interview d'un expert qui souligne les progrès des équipements et leur impact sur l'organisation du travail et la productivité, ainsi qu'un reportage sur une entreprise de plâtrerie qui lutte contre les TMS en développant des équipements en partenariat avec les fabricants.

Références INRS : 00084980 -

Les robots et dispositifs d'assistance physique : États des lieux et enjeux pour la prévention

Jean-Jacques Atain Kouadio et Adel Sghaier

Résumé

Dans un contexte de mutation des entreprises, on assiste depuis 2013 à une émergence de robots, exosquelettes et autres nouvelles technologies d'assistance physique (NTAP) notamment pour tenter de répondre aux problématiques de TMS et de charge physique de travail excessive. Ce document a comme objectif de présenter les principaux points de vigilance liés à l'utilisation des robots et dispositifs d'assistance physique.
