Science Arts & Métiers (SAM)
is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: https://sam.ensam.eu
Handle ID: .http://hdl.handle.net/10985/17176

To cite this version :

Patrick MARTIN, Jacques MARSOT, Bruno DAILLE-LEFEVRE, Xavier GODOT, Gabriel ABBA, Juan-Camilo GOMEZ-ECHEVERRI, Ali SIADAT - New Issues for Workers Safety in the Factory of the Future - 2019

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository Administrator : scienceouverte@ensam.eu

New issues for workers safety in the factory of the future

Martin P., Marsot J., Daille-Lefevre B., Godot X., Abba G., Siadat A., Gomez-Echeverri J.C

Abstract

Human in the factory is one of the main themes of the Factory of the Future, in this context the aim of this paper is to present the new issues for workers safety and the integrated design concepts or methodologies which have to be taking into account. New paradigms come into being: the uncertainty of the demand in terms of products as well as production rate, product customization, integration product / service, the manufacturing processes are not fixed, so the manufacturing times cannot be foreseen, reconfiguration of machine tools as manufacturing systems, space organization, auto-organization, planning …, new technologies are implemented: robots, plug and play devices, virtual / augmented reality, sensors, OPC standards, connected objects,… Several tasks are performed by the workers, the robots or in collaboration. The workers are place in the center of the Factory of the future but this concept introduce hazard events, problems of health and safety (physical or cognitive tasks, fatigue, stress, space or time organization, interfaces Human- robot, to take into account of the different life situations…). So the aim of the paper is to present studies carrying out in order to propose to the machine or manufacturing systems designers as well as production managers structured methods, models, tools in order to get safe working situations in the frame of the factory of the future paradigm.

Keywords: factory of the future; manufacturing systems; human aspects; safety; human-robot collaboration

1 Introduction

De nombreuses études soulignent l'importance dans le paradigme de l'usine du futur de la prise en compte et de l'intégration de l'Homme dans les systèmes de production [1, 2 , 3, 4, 5, 6, 7, 8]. L'usine du futur présente plusieurs angles d'analyse: adaptive and smart production systems, virtual manufacturing, equipment's, advanced manufacturing processes, human and societal aspects (figure 1). On other hand new paradigms come into being:

- the uncertainty of the demand in terms of products as well as production rate,
- product customization, integration product / service,
- the manufacturing processes are not fixed, so the manufacturing times cannot be fore-

seen,

- reconfiguration of machine tools as manufacturing systems (physical reconfiguration, routing, real time control …)
- space organization, auto-organization, planning …
- new technologies are implemented: robots, plug and play devices, virtual / augmented reality, sensors, OPC standards, connected objects, big data, artificial intelligence, cloud computing,
- uses of products as manufacturing equipment are more and more complex,
- integration of mechanical / electrical / electronical equipment's on existing ones
- several tasks are performed by the workers (figure 2), the robots or in collaboration [9, 10, 11,12] following the production needs.

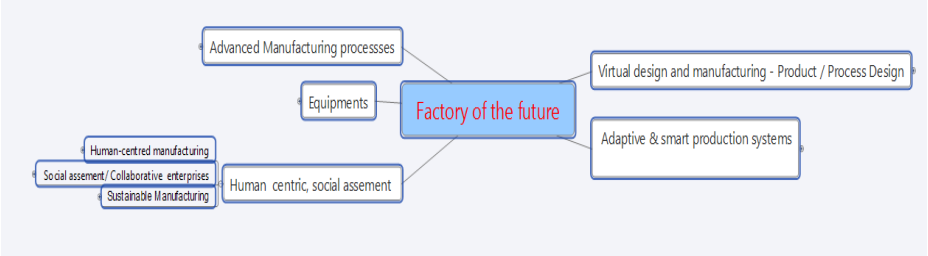

Fig. 1: Several aspects of factory of the future

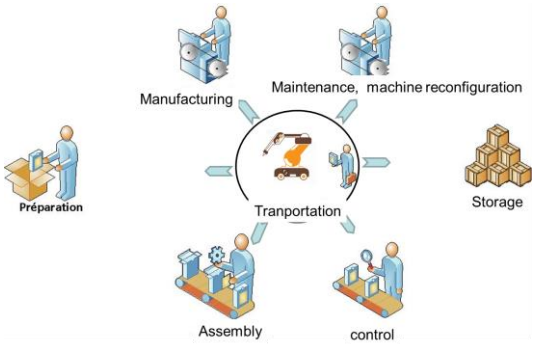

Fig. 2: Task performed by the machine or operators

Les opérateurs au sein de l'usine du futur sont exposés à des problèmes de sécurité (accidents) comme de santé (stress, fatigue, répétitivité des gestes, maintien statique

de postures, vibrations, environnements dangereux, possibilité d'anticiper des situations de travail dangereuses, etc.) [8].
Au sein de l'usine du futur les risques fondamentaux pour la santé – sécurité sont ceux identifiés au niveau de la normalisation [13] par contre leurs occurrences, leur causes, leurs gravités, dépendent directement du nouveau contexte et des nouvelles conditions et situations de travail en particulier en terme de conception des équipements pour la reconfigurabilité, des interactions Homme-robot (transport, assemblage, qualification produit..) et de l'organisation de la production ou du poste de travail (pilotage de la production, lean-manufacturing, auto-organisation, marges de manœuvre..). Ceci conduit à de nombreuses interrogations quant à la santé et sécurité des salariés :

- Comment spécifier, puis concevoir des îlots de production sécurisés qui présentent des périmètres fonctionnels et d'usages évolutifs et adaptés à leurs usages pour différentes situations de vie (montage, réglage, exploitation, modification, .. ?
- Comment protéger les opérateurs dans un environnement en évolution constante (plates-formes autonomes, robots collaboratifs, etc.) ?
- Comment gérer en sécurité les phases de reconfiguration ?
- Quelle est l'impact des robots collaboratifs, des nouvelles interfaces homme-machine, etc. sur l'activité des opérateurs de production et sur leurs encadrants ?
- Peut-on à partir des données de production toujours plus nombreuses, mettre en évidence des signaux faibles annonciateurs d'une situation de travail dangereuse ?
- L'ouverture des systèmes de production au monde extérieur via les réseaux de communication peut-il compromettre la sécurité du travailleur ?
- Comment assurer le conduite de la production dans un environnement variable et perturbé: différence entre prescrit et réel, phases transitoires ?
- Comment assurer la réponse simultanée aux objectifs de performances (productivité, flexibilité, qualité) et de santé- sécurité.

Toutes ces questions nécessitent d'acquérir et de structurer de nouvelles connaissances tant du point de vue de l'ingénierie (méthodes de spécification et de conception, outils de simulation, analyse des risques, définition des mesures de prévention) que des facteurs humains pour arriver à intégrer à ce besoin de flexibilité la prévention des risques professionnels [14, 15, 16, 17]. Ces travaux se positionnent dans le cadre de la démarche dite de « Prévention intégrée » qui consiste à appliquer au plus tôt des principes de conception sûre à un futur équipement de travail |[18].
Aussi l'objectif de cet article est de préciser des verrous, connaissances manquantes, pistes d'études, objets de connaissances permettant d'apporter aux concepteurs de systèmes de fabrication comme aux gestionnaires de production des méthodologies, modèles et outils en réponse aux questions identifiées.

2 Conception des équipements et reconfigurabilité

Les systèmes et machines reconfigurables ont été étudiées depuis de nombreuses années selon un point de vue purement technologique [19, 20, 21]. Cette reconfiguration peut être prise en compte au niveau de la machine (modules, outillages..) (figure 3) , ou ilot (machines, routage..) (figure 4) que ce soit au niveau physique, contrôle - commande (automates, réseau de communication) ou pilotage (centralisé, coordonné, auto – organisé).

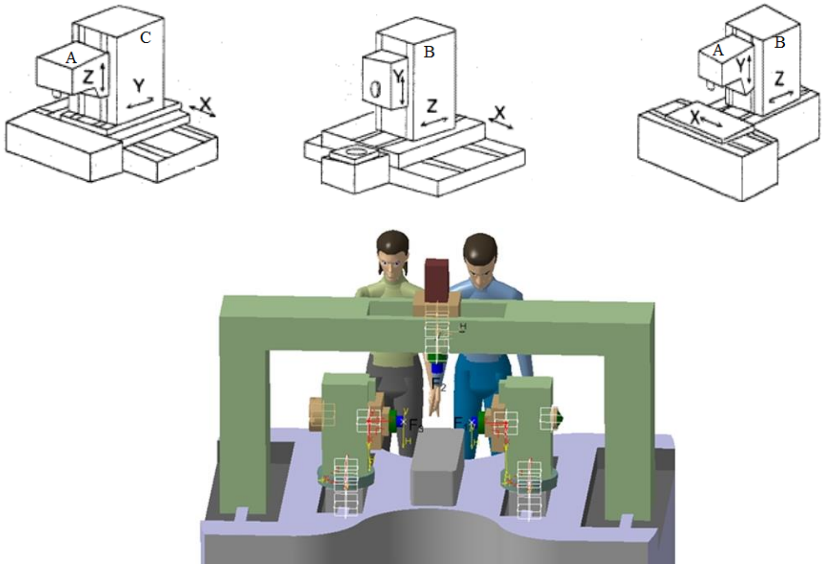

Fig. 3: Machine tool reconfiguration

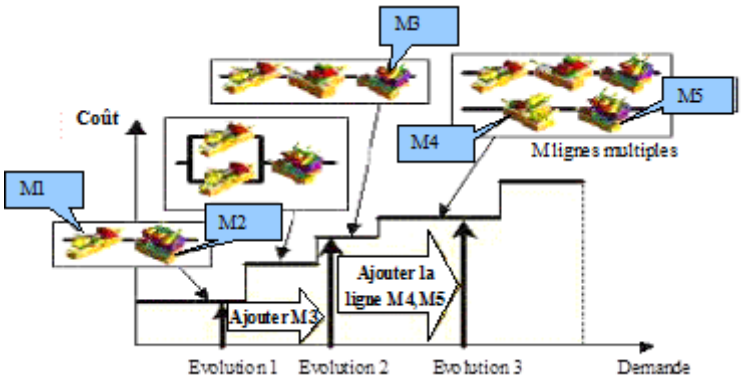

Fig. 4: Product flow reconfiguration

Le concept du Design for Safety recommande l'amélioration du partage des connaissances entre les différents corps de métiers avec une implication forte de l'expert en santé-sécurité et a fait l'objet de nombreux travaux [22, 23, 24,25,26, 27]. L'analyse de l'ensemble de ces méthodes, techniques et outils de conception nous permet de faire les constats suivants [28, 18] :

- aucun cadre de formalisation permettant d'assurer l'identification des éléments clés et les liens entre usage, conception et prévention n'est proposé ;
- la prise en compte de l'ensemble des usages repose principalement sur des mises en situation lors des étapes de validation : revues de projet collaboratives avec des ergonomes et des opérateurs autour de modélisations ou de prototypes. Bien que nécessaire, cette articulation de la démarche de prévention intégrée avec le processus de conception autour des seules étapes de validation n'est pas suffisante car elle ne permet pas de guider le concepteur lors de ses prises de décisions autonomes. La prévention des risques reste de ce fait abordée comme une contrainte de correction et non comme une spécification pour la conception.

De plus les modèles d'usages actuels possèdent des limites vis-à-vis :

- de la spécification de périmètres fonctionnels et d'usages évolutifs ;
- de la gestion du point de vue de la santé-sécurité de la combinatoire des scénarii d'usage possibles et des phases de reconfiguration et ce, en phases de conception architecturale et détaillée.

3 Collaboration Homme- robot

L'introduction des robots au sein des ilots de production partageant des espaces de travail et des tâches est de plus en plus d'actualité, la norme NF EN ISO10218-1 : 2011 [29] définit quatre modes pour la sécurisation d'une installation robotique collaborative :

- mode 1 ou « Arrêt nominal de sécurité contrôlé »

- mode 2 ou « Guidage manuel » : les actions de l'utilisateur guident le robot. La sécurité de l'opérateur repose principalement sur l'utilisation d'un dispositif de validation ;
- mode 3 ou « Contrôle de la vitesse et de la distance de séparation » : lorsque l'opérateur se trouve dans la zone de travail du robot, ce dernier doit maintenir une vitesse déterminée et respecter une distance de séparation avec l'opérateur, de façon à éviter toute collision ;
-mode 4 ou « Limitation de la puissance et de la force du robot » : des mécanismes de détection de contact et de limitation d'effort doivent être intégrés au robot de façon à réduire l'intensité des impacts potentiels entre l'homme et le robot.

En mode 3 les systèmes de détection de personne nécessaires à sa mise en œuvre sont encore au stade de la recherche [30, 31, 32]. Les utilisateurs préfèrent ralentir ou stopper les mouvements du robot en cas d'intrusion dans la zone protégée (mode 1) ou en cas de contact (mode 4) plutôt que d'essayer de modifier sa trajectoire pour maintenir une distance de séparation.
De plus le paradigme de l'industrie du futur conduit à une vue plus globale des différents approches (Figure 5) :

- la mobilité des ressources et outillages ;
- la collaboration sûre entre l'Homme et le robot ;
- la mobilité des robots ;
- les robots multi-bras ;
- la perception des tâches et de leur environnement en temps réel ;
- l'apport cognitif dédié à chaque opérateur.

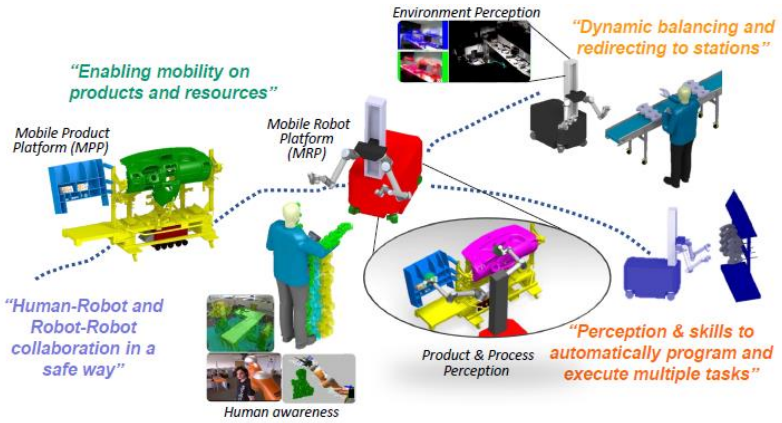

Fig. 5: FOF- NMP Thomas project [33]

D'autre part afin de réduire les coûts et risques liés à la variabilité des produits et de la demande et la validation rapide aux objectifs de production en terme de qualité ou de performances, la simulation est de plus en plus utilisée, par contre les modèles utilisés restent limités. Si certains des logiciels intègrent des modules permettant de visualiser

et de configurer les zones de sécurité en fonctionnement nominal (trajectoires, vitesses, énergies gérées par la commande du robot), il n'est pas garanti que ces modules permettent de vérifier le respect des exigences de sécurité en conditions dégradées. Les mesures de protection utilisables pour la sécurisation d'une cellule collaborative peuvent être de différentes natures : fonctions de sécurité propres au robot, dispositifs de protection périmétriques, surfaciques, volumétriques, etc. Elles ont cependant toutes comme fonction principale d'envoyer au robot un ordre de mise en sécurité, tel qu'un arrêt, en cas de détection d'une situation potentiellement dangereuse : intrusion d'une personne dans une zone protégée, détection d'un dysfonctionnement du robot par exemple. La « distance de sécurité (S) » est l'un des principaux critères à prendre en compte pour le choix, l'implantation et le paramétrage des dispositifs de protection (figure 6). Cette distance permet en effet de s'assurer que les éléments mobiles du robot ne vont pas percuter dangereusement un opérateur.

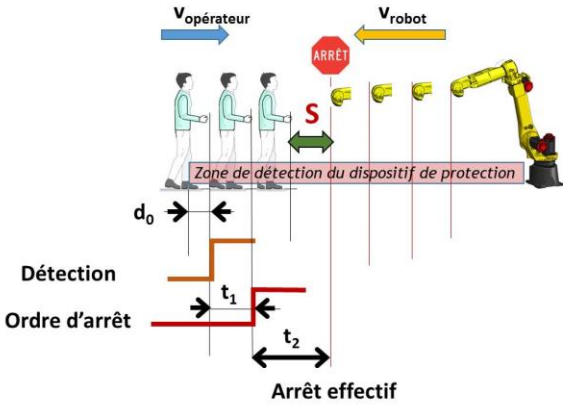

Fig. 6 : Safety distance and and actual stop

4 Working place organisation

Compte tenu des objectifs de productivité comme de réactivité, les approches tels que le lean manufacturing, la planification en juste à temps …et l'exploitation de systèmes de communication, le développement des objets connectés et des interfaces (smartphones, tablettes, réalité augmentée, casques audio.. .) conduisent à des conditions de travail comportant des risques tel que le stress, les troubles musculo-squelettiques, la fatigue. Aussi le concept de marge de manœuvre "possibilité ou liberté dont dispose un travailleur pour élaborer différentes façons de travailler afin de rencontrer les exigences de production et ce, sans effet défavorable sur sa santé" [34] a été introduit par un certain nombre de chercheurs en ergonomie, le concept d'ilot de production a res-

ponsabilité élargie a été proposé. Les marges de manœuvre augmentent la capacité des opérateurs à faire face à la variabilité des situations de travail, elles lui permettent d'absorber l'écart entre le travail prescrit et son travail réel. On distingue 2 niveaux d'implémentation de ces marges [35] : les marges de manœuvres en situation de conception (le concepteur définira un cadre prescriptif plus souple et plus adapté aux contraintes de la future activité de production) et celles d'opérationnelles (amélioration de conditions de travail des opérateurs une fois les installations et l'organisation de production en place dans l'atelier).
Aussi la modélisation de configurations d'ilot de production, de l'organisation spatiale des éléments caractéristiques, des opérations à réaliser et de leurs des éléments, doit permettre de réaliser des scenari d'exploitation et d'identifier ainsi les risques potentiels en matière de santé- sécurité au niveau de la conception comme de l'exploitation.

5 Conclusion

Des sauts technologiques significatifs sont induits par la mise en œuvre de l'usine du futur suivant différents aspects : reconfiguration du système de production utilisant des briques « plug ad produce », les prises d'informations et la réactivité en temps réel, l'exploitation de systèmes automatisés, l'assistance physique et cognitive à l'Homme, l'usine jumelle virtuelle, l'organisation de la production, les procédés à forte valeur ajoutée…. Ainsi les interactions entre l'Homme et les équipements de production sont modifiées afin de répondre aux objectifs de réactivité, de contrôlabilité, d'évolution de l'environnement de travail, ceci conduit pour la santé-sécurité au travail à de nouveaux enjeux tout au long du cycle de conception et d'exploitation du système par la maitrise (identifier, évaluer, agir) de façon dynamique de la situation de travail (interaction système / opérateurs / organisation), La prise en compte de l'ensemble de ces éléments au sein de modèles de configurations d'ilot de production, de l'organisation spatiale des éléments caractéristiques, des opérations à réaliser et de leurs des éléments, permettant de réaliser des scenari d'exploitation et d'identifier ainsi les risques potentiels en matière de santé- sécurité au niveau de la conception comme de l'exploitation sont à développer à partir des outils et connaissances existantes en intégrant les nouveaux enjeux, le contexte industriel et sociétal .

Acknowledgments

This work has been performed in the frame of the dual laboratory between INRS and ENSAM/ LCFC (safety design of working situation: functional requirements, equipment design, working place management) which allows to bring the financial and scientific supports.

5 Referencing

1. Report to the president on ensuring American leadership in advanced manufacturing, Executive office of the President, President's council of advisors on Science and Technology, June 2011; A national strategic plan for advanced manufacturing, Executive Office of the President National and Technology Council, February 2012.
2. Factories of the future. Strategic Multi-annual roadmap. Industrial advisory group FoF; 2010, www.effra.eu
3. Consiglio Nazionale delle Rcerche, Flagship Project 2011-2013, "Factory of the Future, National Manufacturing Platform" (Italie)
4. FUTURPROD : les systèmes de production du futur, Atelier de Réflexion Prospective de l'ANR, www.cluster-gospi.fr, (access 16/01/2018)
5. Pierre Veltz et Thierry Weil : « L'industrie, notre avenir », La Fabrique de l'Industrie, Eyrolles 2015, ISBN : 978-2-212-56115-9
6. « Une industrie européenne plus forte au service de la croissance et de la relance économique », Communication de la commission au parlement européen, au conseil, au comité économique et social européen et au comité des régions, communication sur la politique industrielle {SWD(2012) 299 final}
7. Technologies prioritaires 2020 en mécanique, CETIM 6B13, octobre 2015, ISBN 978-2-36894-079-2
8. Guide pratique de l'usine du futur, enjeux et panorama de solutions, Fédération des Industries Mécaniques, octobre 2015, www.industriedufutur.fim.net , (access 16/01/2018)
9. INRS – Utilisation des robots d'assistance physique à l'horizon 2030 en France. VEP 1, ISBN 978-2-7389-2217-5, 2015, 261 p.
10. Kruger J., Lien T. K., Verl A. - Cooperation of human and machines in assembly lines. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58, 2009, pp. 628–646.
11. Kaivo-Oja J. - The future of work and robotics. Seminar of European Agency for Safety and Health at Work. Bilbao, juin 2015, 30 p.
12. Literature review : the Human Machine Interface as an emerging risk - European Agency for Safety and Health at Work, 2009, ISBN-13: 978-92-9191-300-8, 40 p
13. NF EN ISO 12100: Safety of machinery: General principles for design, Risk assessment and risk reduction, CEN, Bruxelles, 93p, (2010).
14. Kaivo-Oja J. - The future of work and robotics. Seminar of European Agency for Safety and Health at Work. Bilbao, juin 2015, 30 p.
15. Stacey N., Ellwood P., Bradbrook S., Reynolds J., Williams H. - Key trends and drivers of change in information and communication technologies and work location Foresight on new and emerging risks in OSH Working report. European Agency for Safety and Health at Work, 2017, 154 p.
16. Murashov V., Hearl F., Howard J. - Working safely with robot workers: Recommendations for the new workplace. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2016, 13 (3), pp. 61-71.
17. INRS - Modes et méthodes de production en France en 2040 : quelles conséquences pour la santé et la sécurité au travail ? http://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/prospective-2016/synthese-sante-travail2040.pdf, 72 p.

18. De Galvez N., Marsot J., Martin P., Siadat A., Etienne A., A new approach to hazard identification during the design process by analysing energy transfers. Safety Science, Safety Science 95 (2017), Elsevier pp. 1–14
19. Koren Y., Moriwaki T. , Jovane F., Ulsoy G., Van Brussel, "Reconfigurable Manufacturing Systems", Annals of the CIRP, 48/2, 527-540, 1999.
20. Koren Y., "Reconfigurable Manufacturing and Beyond (Keynote Paper)", CIRP 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor, Michigan, 11.-12.05.2005.
21. Garro O., P. Martin P., « Towards new architectures of Machine Tools », International Journal of Production Research, Vol. 31, n° 10, pp. 2403-2414, ISSN 0020-7543, October 1993.
22. Chinniah, Y. (2015)Analysis and Prevention of Serious and Fatal Accidents Related to Moving Parts of Machinery." *Safety Science 75*, pp. 163–173
23. Fadier, E., & De la Garza, C. (2006). Safety design: Towards a new philosophy. *Safety Science*, 44(1), pp. 55-73
24. Houssin, R., and Coulibaly A.,. (2011) An Approach to Solve Contradiction Problems for the Safety Integration in Innovative Design Process. *Computers in Industry* 62 (4): pp. 398–406
25. Ghemraoui, R., L. Mathieu, and N. Tricot. (2009a). Design Method for Systematic Safety Integration. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 58:, pp.161–164.
26. Khan, F., S. Rathnayaka, and S. Ahmed. (2015) Methods and Models in Process Safety and Risk Management: Past, Present and Future. *Process Safety and Environmental Protection 98*, pp.116–147.
27. Shahrokhi, M., & Bernard, A. (2009). A framework to develop an analysis agent for evaluating human performance in manufacturing systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology,* 2(1), pp.55-60.
28. Sadeghi L.,Siadat A., Marsot J., Dantan J. Y., (2016) Design for Human Safety in Manufacturing System: A Review of Applications of Design Theories and Methodologies and Design Tools and Techniques. *Journal of engineering design 27, (*12), pp. 844–77. doi:10.1080/ 09544828.2016.1235262.
29. NF EN ISO 10218-1 - Exigences de sécurité pour les robots industriels – Robots et dispositifs robotiques - Partie 1 : Robots. Paris, AFNOR, 2011, 45 p.
30. MEGUENANI A., PADOIS V., DA SILVA J., HOARAU A., BIDAUD P. - Energy based control for safe human-robot physical interaction. International Symposium on Experimental Robotics (ISER), 2016, Tokyo, Japan, 12 p.
31. SCHLEG T., KROGER T., GASCHLER A., KHATIB O., ZANGL H. - Virtual whiskers – Highly responsive robot collision avoidance, IEEE, 2013, 7 p.
32. BEHRENS R., SAENZ J., VOGEL C., ELKMANN N. - Upcoming technologies and fundamentals for safeguarding all forms of human robot collaboration, SIAS Königswinter, Germany, 2015, 6 p.
33. Thomas project ," Mobile dual arm robotic workers with embedded cognition for hybrid and dynamically reconfigurable manufacturing systems" , FoF.NMP-723616, http://www.thomas-project.eu/

34. Durand, M., Vézina, N., Baril, R., Loisel, P., Richard, M.C., Ngomo , S., (2008) La marge de manœuvre de travailleurs pendant et après un programme de retour progressif au travail,IRSST:http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-566.pdf
35. Coutarel, F. (2004) La prévention des troubles musculo-squelettiques en conception : quelles marges de manœuvre pour le déploiement de l'activité ? Thèse de doctorat en ergonomie, Université Victor Segalen. Bordeaux 2, Editions du Laboratoire d'Ergonomie des Systèmes Complexes