

# La problématique de l'utilisation des robots industriels en matière de sécurité

La robotique connaît depuis quelques années une expansion importante. Les applications faisant appel à des robots sont de plus en plus variées et les limites physiques entre l'homme et le robot diminuent. De nouvelles problématiques liées à la sécurité et à la prévention des accidents du travail voient donc le jour dans ce domaine, ce qui nécessite l'identification, puis la réduction des risques associés à l'utilisation de ces robots. Il est important d'imaginer les systèmes qui permettront à l'homme de travailler en toute sécurité avec des robots. La première partie de l'article propose un premier état de l'art des travaux autour de la sécurité en robotique industrielle, ainsi qu'une étude préliminaire des accidents du travail causés par les robots. Des solutions permettant d'améliorer la sécurité seront analysées dans la deuxième partie de l'article.

Par Adel SGHAIER et Philippe CHARPENTIER\*

---

## INTRODUCTION

Depuis quelques années, on assiste à des progrès scientifiques et technologiques dans les différents domaines d'application de la robotique : mécanique, électronique, automatique et informatique. Essentiellement cantonné au domaine manufacturier pour réaliser des tâches complexes, pénibles et/ou répétitives ou pour opérer dans des milieux inaccessibles à l'homme (exploration planétaire, nucléaire,...), le spectre des applications envisageables s'élargit aujourd'hui

d'hui considérablement [1, 2]. Outre des applications industrielles de plus en plus nombreuses et variées, on trouve maintenant des robots de service, d'assistance ou encore d'aide aux handicapés ou aux personnes âgées.

Les prévisions laissent présager d'une forte croissance du marché des systèmes robotisés pour les décennies à venir, qu'illustre la figure 1.

Nombreuses sont les applications qui font sortir les robots des cages dans lesquelles ils étaient encore récemment enfermés. Cette suppression des barrières

---

\* Institut national de recherche et de sécurité (INRS).

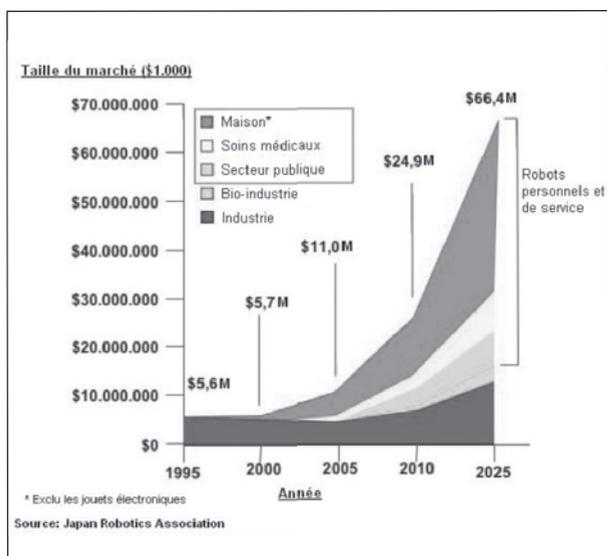


Figure 1 : Croissance du marché des systèmes robotisés (extrait du document EUROP – juillet 2006)

physiques jusqu'alors utilisées pour protéger les hommes (opérateurs ou tiers) des mouvements dangereux des robots a été rendue possible par les évolutions des dispositifs de protection [5].

Les robots deviennent coopératifs : ils sont conçus pour interagir avec l'homme au sein d'un espace de

travail partagé dans lequel robot et humain peuvent réaliser des tâches simultanément [3].

La sécurité des opérateurs pose dès lors des problèmes d'un genre nouveau dus à la proximité entre le robot et l'opérateur, au sein d'un même espace qui n'est ni délimité ni protégé.

## LES RISQUES EN ROBOTIQUE INDUSTRIELLE

L'utilisation d'un robot pour réaliser une tâche industrielle, comme c'est le cas pour toutes les machines, peut générer des accidents du travail et des maladies professionnelles. Ces dangers peuvent survenir aussi bien lors de l'utilisation du robot que lors de sa maintenance ou de son réglage.

### Phénomènes dangereux liés à l'utilisation des robots industriels

L'utilisation de robots industriels comporte des risques pour l'homme. Dans le cadre de l'analyse du risque des robots industriels, il est nécessaire d'identi-



© Jean-Claude Moschetti/REA

« Nombreuses sont les applications qui font sortir les robots des cages dans lesquelles ils étaient encore récemment enfermés ».



Figure 2 : Accidents du travail liés à l'utilisation de robots

fier les différents phénomènes dangereux qui sont associés à leur utilisation.

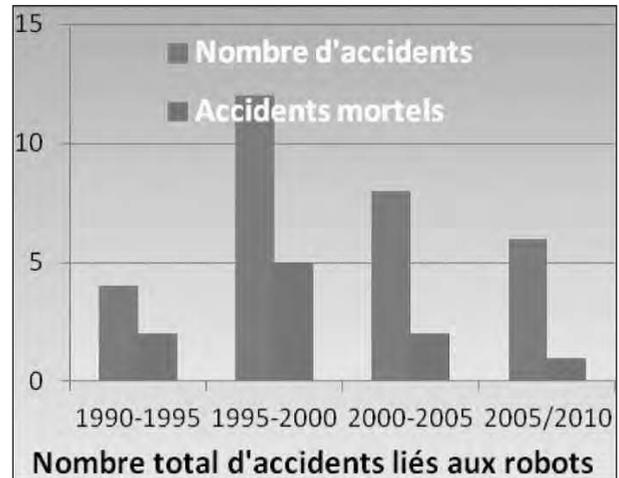
On retrouve une identification détaillée des phénomènes dangereux (sources potentielles des dommages) liés à l'utilisation des robots industriels dans l'annexe A de la norme EN ISO 10218-1 relative aux exigences de sécurité des robots industriels [4]. Dans ce document, ces phénomènes dangereux sont répartis au sein de dix catégories suivantes :

- mécaniques ;
- électriques ;
- thermiques ;
- liés au bruit ;
- à des vibrations ;
- liés à des radiations ;
- liés à certaines substances ;
- liés à l'ergonomie ;
- associés à l'environnement dans lequel la machine est utilisée ;
- enfin, des combinaisons des différents risques précités.

#### Les accidents de travail liés à l'utilisation des robots

L'analyse de la base de données publique des accidents du travail de l'Institut National de Recherche et Sécurité (INRS) - la base EPICEA (1) -, permet d'identifier trente accidents du travail liés à l'utilisation de robots industriels entre 1990 et 2010, la totalité de ces accidents étant liés à des phénomènes dangereux d'ordre mécanique. En effet, du fait du mouvement rapide d'un robot et des forces exercées par ses parties mobiles, une collision entre un homme et ce robot peut avoir des conséquences dramatiques. Sur les trente accidents recensés, dix accidents mortels sont à déplorer (voir la figure 2).

Il est intéressant de classer ces accidents suivant leurs causes afin de mieux identifier les sources de risques liés à l'utilisation des robots en milieu industriel. En première approche, les origines des phénomènes dan-



gereux des accidents de la base EPICEA sont les suivantes :

- **Accès non autorisé** : il s'agit de la cause d'accident qui revient le plus souvent. Les accès à l'espace de travail du robot sont conçus de telle façon que l'opérateur peut pénétrer dans la zone dangereuse sans utiliser les accès sécurisés ou en désactivant les dispositifs de sécurité présents.
- **Erreur liée à l'utilisation** : ces accidents impliquent souvent des personnes peu expérimentées.
- **Conception incorrecte des protecteurs et des dispositifs de sécurité** : les dispositifs de sécurité sont soit absents soit mal installés.

Bien que n'étant pas exhaustive, la base de données EPICEA permet de se faire une idée des types d'accidents du travail causés par des robots industriels. On constate que la plupart de ces accidents sont dus à une collision entre l'utilisateur et une partie mobile du robot. Nous allons donc nous focaliser dans la suite de cet article sur ce type d'accident.

#### ÉTAT DE L'ART DE LA PRÉVENTION EN ROBOTIQUE

##### Travaux au niveau des institutions de sécurité

Des organismes de recherche en sécurité se penchent sur la problématique de la sécurité des robots. C'est ainsi que 20 % des communications des deux dernières éditions du congrès SIAS (2) (2007 - 2010) ont porté sur la robotique, montrant l'investissement consenti par l'industrie manufacturière pour traiter les risques liés à l'utilisation des robots.

(1) Étude de prévention par l'informatisation des comptes rendus d'enquêtes d'accidents du travail.

(2) Safety of Industrial Automated Systems.

| <b>Recherche de base</b>        | <b>USA</b> | <b>Europe</b> | <b>Japon/Corée</b> |
|---------------------------------|------------|---------------|--------------------|
| <i>Mobilité</i>                 | ****       | **            | *                  |
| <i>Perception</i>               | ****       | ***           | ***                |
| <i>Autonomie</i>                | ****       | ***           | ***                |
| <i>Interaction avec l'homme</i> | ***        | **            | *                  |
| <i>Manipulation</i>             | **         | *             | *                  |
| <i>Applications</i>             |            |               |                    |
| <i>Industrie</i>                | *          | **            | ***                |
| <i>Service</i>                  | **         | ****          | ***                |
| <i>Robotique</i>                | *          | **            | ****               |

**Tableau 1** : Les axes de recherche selon les continents d'après le WTEC (Activité proportionnelle au nombre d'étoiles)

Le Centre Technique de Recherche finlandais VTT a, par exemple, réalisé une étude des accidents dus aux robots industriels survenus en Finlande [5]. Sur les 67 accidents dénombrés, 55 % sont survenus lors d'opérations annexes à la production : réglage et programmation, dépannage, maintenance, alors que seulement 13 % concernaient la production. 21 % des accidents avaient été provoqués par les mouvements du robot, 39 % par la manipulation de charges ou d'outils. Le VTT a relevé des origines techniques pour certains accidents, par exemple, une protection inadéquate lors d'une intervention à l'intérieur de la zone d'évolution hors des phases de production, mais aussi des origines liées à l'utilisation du robot (par exemple, dans le cas d'un opérateur surpris par un mouvement normal du robot). Dans la continuité de ces travaux, le VTT a élaboré une stratégie de prise en compte de la sécurité pour différentes configurations de robots en fonction des possibilités d'interactions entre l'homme et le robot [5].

Le NPO (3) a proposé lors de l'édition 2010 du congrès SIAS une méthodologie d'analyse de risque adaptée pour tenir compte de l'impossibilité d'isoler le robot, en particulier les robots de service [3]. La « coexistence » entre l'homme et le robot y est abordée *via* les aspects techniques, éthiques, économiques et sociaux. Le JNIO-SH (4) s'est pour sa part associé à la société OPTEX pour étudier la faisabilité d'un système de vision spécifiquement dédié à la détection de personnes placées dans des situations de collaboration avec un robot [6].

L'IFA (5) a, quant à lui, publié en 2009 un guide pour la conception des lieux de travail dans lesquels évoluent des robots collaboratifs [7]. Des recommandations y sont listées portant sur quatre aspects : technologique (lié au matériel du robot), médical et biomédical (on y trouve des critères de blessures définis sur la base d'une étude bibliographique), ergonomique (un aspect qui traite de l'espace dans lequel le robot et l'homme évoluent), l'organisation du travail (pour indiquer les mesures organisationnelles à mettre en place, en particulier pour éviter les collisions). Par

ailleurs, l'IFA travaille en coopération avec des universités allemandes pour développer une architecture de zone robotisée dans laquelle l'environnement du robot est surveillé en permanence, permettant ainsi de prédire les comportements de l'opérateur et d'améliorer, par voie de conséquence, la sécurité globale de l'installation [8].

#### Recherches universitaires

Un grand nombre de projets de recherche universitaires sont actuellement menés sur la robotique et la co-activité associée. Le tableau 1, établi en 2006 par le WTEC (6), indique les axes majeurs de recherche dans ce domaine aux États-Unis, en Europe et au Japon+Corée [9].

De nombreux programmes internationaux existent, dont un certain nombre sont fédérés dans la structure EURON (7) [2]. Certains, comme le projet SMERobot™, ont été menés en association avec les constructeurs de robots [10]. La France était présente dans ce projet, *via* le CETIM (8), pour participer en particulier à la dissémination des résultats techniques de ce projet auprès des PME/PMI françaises.

En France, on recense environ soixante équipes travaillant sur la robotique [11] dans des domaines tels que :

- les contrôles sensori-moteurs, la perception (action et mouvement),
- la cognition, la décision, l'autonomie et l'apprentissage,

(3) Safety Engineering Laboratory, Japon.

(4) Japan National Institute of Occupational Safety and Health.

(5) Institut für Arbeitsschutz, Allemagne.

(6) World Technology Evaluation Center.

(7) European Robotics Network.

(8) Centre Technique des Industries Mécaniques.

- l'interaction et la coopération,
  - la conception des systèmes robotiques.
- Des projets de recherche se focalisent sur les aspects liés à la co-activité homme-robot, comme le projet PHRIENDS (9) [12, 13], dont la vocation était de développer les composants clés de la prochaine génération de robots conçus pour partager l'environnement avec l'homme et interagir physiquement avec des personnes. Ce projet visait les robots industriels, mais aussi les dispositifs d'aide (qui incluent des robots pour le marché émergent des applications non-industrielles, comme par exemple des robots de service ou de santé/soins).

---

### La sécurité du point de vue de la norme

Les aspects de la sécurité des robots industriels sont détaillés dans la norme EN ISO 10218 [4]. Cette norme est composée de deux parties traitant, pour la première, des recommandations aux concepteurs de robots et, pour la seconde, de la sécurité en matière d'utilisation de robots industriels.

Cette norme est bien adaptée aux robots industriels de type classique. Ses recommandations vont principalement dans le sens de l'isolation de l'utilisateur de la zone de travail du robot pendant le fonctionnement normal de ce dernier. Le fonctionnement du robot est décomposé en trois cas : fonctionnement normal (production), maintenance et apprentissage. Lors du fonctionnement normal du robot, la norme préconise d'interdire (au moyen de protecteurs) la présence de l'homme dans l'espace de travail du robot. Cette fonction peut être assurée, par exemple, par l'utilisation de cages munies de portes de sécurité. La présence de l'utilisateur à proximité du robot n'est autorisée que pendant les temps de maintenance ou d'apprentissage, au cours desquels le robot ne doit pas dépasser la vitesse de 250 mm/s (millimètres par seconde). Cette contrainte permet à l'utilisateur d'anticiper les mouvements du robot afin de pouvoir éviter toute collision.

Les recommandations de la norme EN ISO 10218 peuvent s'avérer insuffisantes ou inadaptées dans le cadre du travail de l'homme à proximité du robot, comme c'est le cas pour les robots collaboratifs. En effet, dans ce cas de figure, le robot doit garder sa vitesse de fonctionnement optimale tout en évoluant à une distance réduite de l'utilisateur.

---

### QUELQUES SOLUTIONS DE SÉCURITÉ

Lors de la présence d'une personne dans l'espace de travail d'un robot, les risques de collision existent du fait de la vitesse de déplacement dudit robot et de la difficulté d'anticiper certains des mouvements de ses parties mobiles. Il est possible qu'un utilisateur se

trouve dans le champ d'action du robot lorsque celui-ci travaille à pleine vitesse. Plusieurs cas d'accès non autorisés sont répertoriés dans la base de données des accidents du travail (voir la figure 2). Il existe donc des risques qui doivent être réduits en suivant la démarche de la directive machine [14] déclinée dans la norme EN ISO 12100 [15], à savoir appliquer des mesures de prévention intrinsèques, mettre en place des protections et des mesures de protection complémentaires et, enfin, donner les informations nécessaires à une bonne utilisation du robot.

Du point de vue fonctionnel, un robot industriel peut être décomposé en une partie commande et une partie opérative (voir la figure 3). Des solutions de sécurité existent au niveau des différentes parties du robot : solutions intrinsèques aux niveaux de l'architecture mécanique du robot, des actionneurs et des capteurs du robot, et solutions innovantes au niveau de la commande du robot.

Nous allons présenter ci-après un certain nombre de techniques novatrices portant pour la plupart sur la réduction de l'effet d'une collision entre un robot et les opérateurs se trouvant à proximité.

---

### Sécurité de la partie opérative

La sécurité de la partie opérative des robots travaillant à proximité ou en collaboration avec l'homme peut être améliorée en diminuant l'impact d'une collision accidentelle avec l'utilisateur. La plupart des solutions de ce type concernent la partie mécanique et les actionneurs du robot.

Afin de réduire la force de l'impact d'une collision d'un robot avec un homme (voire même d'éviter toute collision), une première voie serait de diminuer la vitesse de mouvement des parties mobiles. Cette solution n'est généralement pas acceptable dans un milieu industriel, en raison de son impact négatif sur la productivité. La nécessité de garder les cadences de fonctionnement à un rythme élevé amène à rechercher d'autres solutions.

### *Robot à masse faible*

Une solution ayant pour but de diminuer la masse de la partie mobile d'un robot manipulateur a été proposée par l'Institut de robotique et de mécatronique de l'Agence aérospatiale allemande (DLR) (10). Le bras robotisé conçu par ce laboratoire est d'une masse faible (13,5 kg), mais il conserve un rapport poids/capacité de charge important (voir la figure 4).

(9) Physical Human-Robot Interaction: DepENDability and Safety.

(10) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

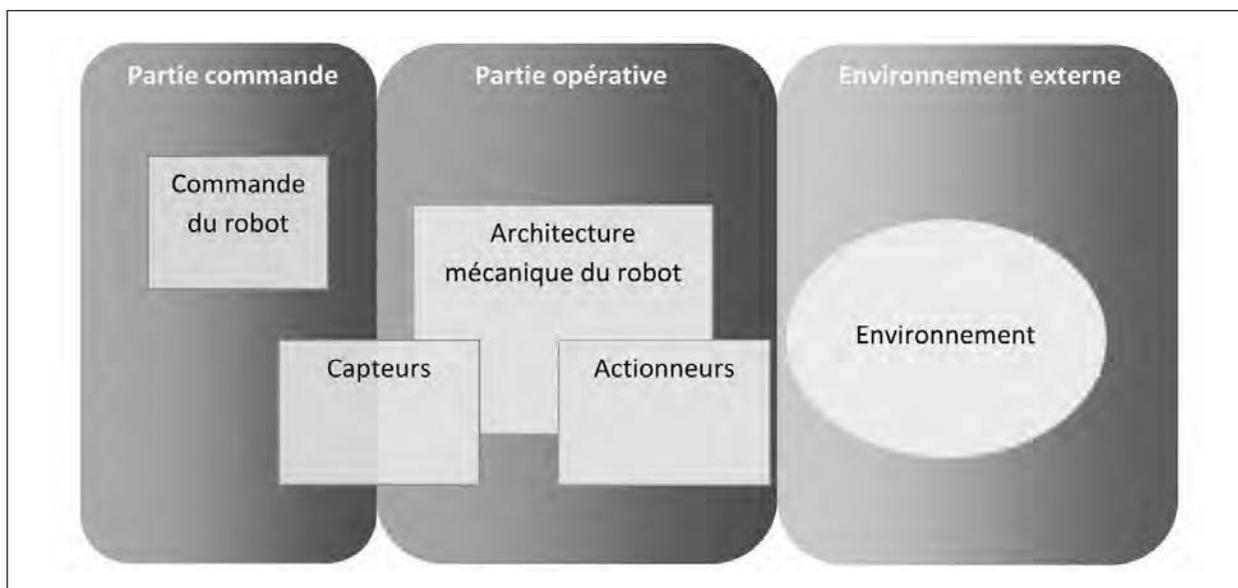


Figure 3 : Architecture fonctionnelle d'un robot industriel

Différentes technologies de capteurs articulaires (et de commandes) permettent de disposer d'un robot performant tout en améliorant la sécurité pour l'utilisateur [13]. Ce travail a fait l'objet d'un transfert de technologie par l'industriel KUKA dans le cadre du projet européen PHRIENDS.

De plus, il est possible de recouvrir les parties mobiles du robot avec un matériau amortissant afin de réduire l'effet d'une collision avec l'utilisateur. Dans une démarche de prévention des risques d'une machine, il sera bien sûr nécessaire de coupler ces méthodes à des systèmes de sécurité classiques et à des stratégies de commande permettant d'assurer la sécurité.

#### *Actionneurs à raideur variable*

Une autre voie pour améliorer la sécurité des robots consiste à concevoir autrement les actionneurs. Un effort d'intégration et de distribution des actionneurs peut être fait dans le cadre de la réduction de la masse des parties mobiles.

Une des solutions permettant de réduire les dommages occasionnés par une collision entre une partie mobile du robot et l'utilisateur est de travailler sur la *compliance* (celle-ci pouvant être définie comme étant « la capacité d'un manipulateur à avoir un comportement souple ; le robot compliant peut subir un déplacement sous l'effet d'un effort dû au contact du manipulateur avec son environnement, cet effort restant cependant dans des limites raisonnables pour la tâche considérée »). L'utilisation d'actionneurs électriques à raideur variable permettrait d'augmenter la compliance des robots travaillant à proximité de l'homme [16, 17].

Une telle solution peut cependant avoir des répercussions négatives sur les performances du robot et sur sa productivité. Il est donc nécessaire d'associer à cette solution une stratégie de commande performante permettant de contrôler la raideur (et donc l'élasticité) des actionneurs du robot, suivant la tâche à exécuter. Une autre solution permettant de garantir les performances du robot tout en lui conférant un comportement compliant est l'utilisation de mini-actionneurs distribués au niveau des articulations et associés à des actionneurs à raideur variable déportés [18].

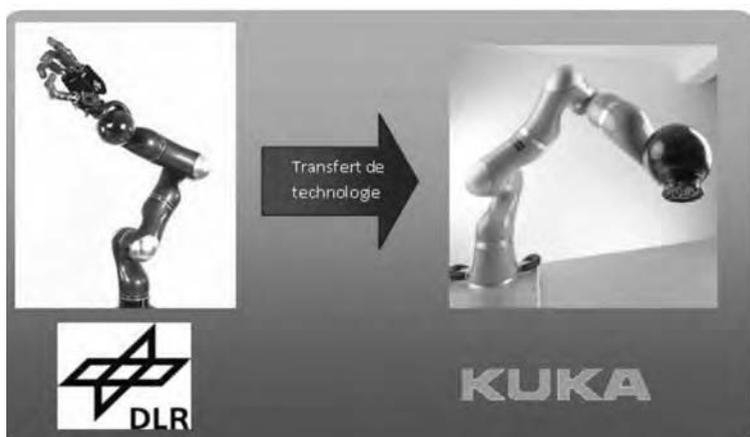


Figure 4 : Le bras robotisé à faible masse DLR/KUKA

## Sécurité de la partie commande

Comme pour la partie opérative, des modifications de la partie « commande » des robots sont susceptibles d'en améliorer la sécurité.

### *Commande du robot en effort/capteurs d'efforts*

Les robots industriels classiques sont généralement commandés en position, ce qui permet de commander facilement le déplacement de la partie mobile dans un environnement fixe et connu. Après des opérations d'apprentissage, le robot est capable de répéter à l'infini les mêmes gestes dans un environnement d'où l'homme est exclu par des dispositifs de protection des types cages ou barrières immatérielles (conformément aux recommandations de la norme EN ISO 10218) [19]. En l'absence de dispositif de détection approprié, ce type de commande est inadapté, voire dangereux, en cas de travail de l'homme à proximité du robot.

Un autre type de commande est basé sur l'asservissement des efforts exercés par le robot sur son environnement extérieur en plus de son asservissement de position. Dans différents travaux de la communauté robotique, on retrouve des techniques de détection de collision qui se basent sur l'association de capteurs d'efforts (au niveau des articulations) à la commande en effort. Cette technique permet de détecter les efforts exercés par le robot sur l'homme en cas de collision et de réduire ainsi la gravité des blessures dues à ce type de collision. Cette méthode a notamment été utilisée dans la conception du bras robotisé à faible masse DLR/KUKA développé par le groupe de recherche PHRIENDS [19].

En revanche, cette solution est moins efficace pour les manipulateurs robotisés à forte masse et à forte vitesse. En effet, le temps de réponse de la détection de collisions peut être insuffisant lorsque la vitesse d'évolution du robot est rapide. De plus, dans le cas de fortes masses, la collision (même si le mouvement du robot est stoppé par ce type de dispositif) risque de causer des dommages importants chez l'opérateur.

### *Capteurs tactiles*

Une autre méthode de prévention des collisions entre l'homme et le robot utilise des capteurs de contact. Plusieurs recherches sont en cours dans le but de développer des capteurs qui permettent d'équiper le robot d'une sorte de sens du toucher. Ce type de capteurs, associés à d'autres systèmes de sécurité et à une stratégie de commande performante, stoppe l'action du robot dès l'entrée en contact du robot avec un utilisateur.

Différentes techniques sont utilisées pour détecter le contact entre l'homme et le robot. Certaines techniques préconisent d'équiper le robot d'un capteur se présentant sous la forme d'une membrane capacitive [20]. D'autres utilisent des capteurs de pression pour exercer cette fonction [21]. Comme dans le cas des capteurs d'efforts, cette technique peut s'avérer insuffisante dans le cas de robot rapide et/ou à forte masse.

### *Techniques d'évitement de collisions*

Les différentes solutions décrites précédemment permettent de réduire la force de l'impact d'une collision entre le robot et l'utilisateur. Mais le but premier de la sécurisation des robots industriels, dans le cadre d'un travail à proximité de l'homme ou dans celui du travail collaboratif, est d'éviter les collisions entre les parties mobiles du robot et l'être humain.

Il existe différents travaux sur la détection de présence et de mouvements d'utilisateurs à proximité de robots. Ces travaux préconisent souvent d'équiper les robots d'un système de vision leur permettant de détecter, voire d'anticiper, la proximité d'une partie du corps de l'utilisateur. Le robot peut ensuite commander un mouvement en vue d'éviter toute collision avec son utilisateur [22, 23]. Ce type de solution se base généralement sur la modélisation de l'être humain et sur celle du robot afin d'éviter les collisions. D'autres solutions proposent d'anticiper les mouvements de l'utilisateur grâce à des modèles prédictifs afin d'optimiser l'évitement de collisions [8]. Il est, bien entendu, nécessaire, dans ce type de solution, d'associer au système de vision un algorithme de planification de trajectoire en temps réel qui soit performant.

## CONCLUSION

L'utilisation d'un robot industriel, à l'instar de celle de toute machine, peut s'avérer dangereuse pour l'utilisateur. Il est donc nécessaire de réaliser une analyse des risques afin d'identifier ces dangers. Une analyse statistique des accidents du travail générés par les robots industriels en France démontre clairement que le risque prédominant lié à l'utilisation de ce type de machine est celui de collision avec l'utilisateur. Nous nous sommes donc focalisés sur ce risque dans cet article, mais cela ne signifie pas que les autres risques doivent être négligés.

Plusieurs laboratoires s'intéressent à la sécurité des robots travaillant à proximité de l'homme. En effet, ce type de robot comporte des risques élevés de collision avec l'utilisateur. Dans ce cadre, nous avons énuméré dans cet article différentes solutions qui portent tant sur la partie opérative que sur la partie commande du

robot. Certaines de ces solutions permettent d'anticiper (et donc d'éviter) les collisions avec l'utilisateur, tandis que d'autres cherchent à en réduire la gravité. Il est difficile d'obtenir une solution de sécurité parfaite pour les robots industriels : le temps de réponse des solutions d'évitement peut s'avérer insuffisant (dans le cas de robots rapides), les solutions de réduction d'impact peuvent être inefficaces (dans le cas de robots à forte masse), etc. Une voie intéressante serait probablement d'associer différents types de solutions de sécurité afin de réduire au maximum le risque que représente un robot évoluant à proximité de son utilisateur.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] DARIO (P.), DILLMAN (R.) & CHRISTENSEN (H. I.), *Roadmap of robotic research*, EURON, 2004.
- [2] CHRISTENSEN (H. I.), *A Roadmap for US Robotics: From Internet to Robotics*, Computing Community Consortium, 2009.
- [3] KABE (T.), TANAKA (K.), IKEDA (H.) & al., "Consideration on safety for emerging technology - Case studies of seven service robots", *Safety Science*, vol. 48, n° 3, pp. 296-301, 2010.
- [4] Norme ISO: NF EN ISO 10218 : *Exigences de sécurité pour les robots industriels - Robots et dispositifs robotiques*, 2011.
- [5] MALM (T.), VIITANIEMI (J.), LATOKARTANO (J.) & al., "Safety of Interactive Robotics - Learning from Accidents", *International Journal of Social Robotics*, vol. 2, n° 3, pp. 221-227, 2010.
- [6] MURATA (N.), IKEDA (H.), SHIMIZU (S.) & al., *Feasibility study on a range image camera applied as a human presence sensing device for a human-machine collaboration*, in 6<sup>th</sup> International Conference on Safety of Industrial Automated Systems, Tampere, pp. 14-15, 2010.
- [7] *BGIA: BG/BGIA risk assessment recommendations according to machinery directive: Design of workplaces with collaborative robots*, BGIA – Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance, 2009.
- [8] DOMINIK (S.), BJÖRN (O.), HAO (D.) & al., *An Approach for Safe and Efficient Human-Robot Collaboration*, in 6<sup>th</sup> International Conference on Safety of Industrial Automated Systems, Finland, 2010.
- [9] BEKEY (G.), AMBROSE (R.), KUMAR (V.) & al., *International assessment of research and development in robotics*, WTEC, 2006.
- [10] NILSSON (K.), JOHANSSON (R.), ROBERTSSON (A.) & al., *Productive robots and the SMERobot™ project*.
- [11] DOMBRE (E.), *Argumentaire pour un programme ANR en Robotique*, GDR Robotique, 2009.
- [12] DE SANTIS (A.) & B. SICILIANO (B.), *Safety issues for human-robot cooperation*, in Tools and Perspectives in Virtual Manufacturing, Napoli, 2008.
- [13] HADDADIN (S), SUPPA (M.), FUCHS (S.) & al., *Towards the robotic co-worker*, *Robotics Research*, vol. 70, pp. 261-282, 2011.
- [14] Directive 2006/42/CE du Parlement européen et du Conseil du 17 mai 2006 relative aux machines et modifiant la directive 95/16/CE (refonte), p. 63, 2006.
- [15] Norme ISO : NF EN ISO 12100 : *Sécurité des machines - Principes généraux de conception - Appréciation du risque et réduction du risque*, p. 93, 2010.
- [16] HYUN (D.), YANG (H.S.), PARK (J.) & al., *Variable stiffness mechanism for human-friendly robots*, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 45, n° 6, pp. 880-897, 2010.
- [17] VAN DAMME (M.), BEYL (P.), VANDERBORGHT (B.) & al., *The Role of Compliance in Robot Safety*, in IARP Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments (DRHE), pp. 65-71, 2010.
- [18] ZINN (M.), ROTH (B.), O. KHATIB (O.) & al., "A new actuation approach for human friendly robot design", *The International Journal of Robotics Research*, vol. 23, n° 4-5, p. 379, 2004.
- [19] DE SANTIS (A.), SICILIANO (B.), DE LUCA (A.) & al., "An atlas of physical human-robot interaction", *Mechanism and Machine Theory*, vol. 43, n° 3, pp. 253-270, 2008.
- [20] PHAN (S.), QUEK (Z. F.), SHAH (P.) & al., *Capacitive Skin Sensors for Robot Impact Monitoring*, in IEEE/RSJ IROS, San Francisco, 2011.
- [21] FRITZSCHE (M.), ELKMANN (N.) & SCHULENBURG (E.), *Tactile sensing: a key technology for safe physical human robot interaction*, in Proceedings of the 6th international conference on Human-robot interaction, Lausanne, Suisse, 2011.
- [22] KULIC (D.) & CROFT, (E.), "Pre-collision safety strategies for human-robot interaction", *Autonomous Robots*, vol. 22, n° 2, pp. 149-164, 2007.
- [23] DE SANTIS (A.), LIPPIELLO (V.), SICILIANO (B.) & al., *Human-Robot Interaction Control Using Force and Vision: Advances in Control Theory and Applications*, Lecture Notes in Control and Information Sciences, pp. 51-70, Springer Berlin/Heidelberg, 2007.