

Robotique collaborative
**Évaluation des fonctions de sécurité
et retour d'expérience des travailleurs,
utilisateurs et intégrateurs au Québec**

Sabrina Jocelyn
Damien Burlet-Vienney
Laurent Giraud
Adel Sghaier

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-974



NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST (preventionautravail.com)
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2017
ISBN : 978-2-89631-949-7
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
mai 2017

Robotique collaborative
**Évaluation des fonctions de sécurité
et retour d'expérience des travailleurs,
utilisateurs et intégrateurs au Québec**

Sabrina Jocelyn, Damien Burlet-Vienney, Laurent Giraud
IRSST

Adel Sghaier
Institut national de recherche et de sécurité (INRS), France

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-974



Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Cliquez recherche



Cette publication est disponible en version PDF sur le site Web de l'IRSST.



ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

L'équipe de recherche tient à remercier :

- Les entreprises qui l'ont accueillie, ainsi que les donneurs d'ouvrage, les intégrateurs et les travailleurs qui ont participé à l'étude. Sans leur collaboration, leur disponibilité et leur ouverture, ce projet de recherche n'aurait pas été possible. Par souci de confidentialité, le nom des entreprises et de leurs installations ont été codés.
- M. Jean-Paul BELLO de l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) en France pour ses commentaires constructifs durant la réalisation du volet théorique de ce projet de recherche.
- M. François OUELLET, conseiller en valorisation à l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) et les membres du comité de suivi qui ont encadré la réalisation de l'étude.
- Tous ceux et celles qui ont contribué au processus de recrutement d'entreprises et de correction du rapport de recherche.

SOMMAIRE

Depuis 2010, l'industrie utilise un nouveau genre de robot capable d'interagir avec les travailleurs en production ou simplement de partager le même espace de travail. On les appelle « robots collaboratifs » ou cobots. Le cobot se distingue des robots conventionnels par l'interaction entre la machine et le travailleur; il accompagne ce dernier, l'assiste ou l'aide à réaliser des tâches. Toutefois, ce changement technologique fait apparaître de nouveaux risques surtout en production : risques de collisions (puisque l'humain peut être en contact avec le cobot), risques de troubles musculosquelettiques (TMS) (même si le cobot est conçu pour les éviter, il faut savoir le manipuler correctement pour limiter ou éviter ces troubles), risques psychosociaux (stress lié aux mouvements du cobot et à sa cadence de production), etc. Face à cela, une étude exploratoire a été menée. Elle visait, d'une part, à émettre des recommandations en matière de sécurité au travail concernant la mise en œuvre de robots dans un contexte collaboratif et, d'autre part, à formuler des pistes de réflexion en vue d'outiller les intervenants au regard de l'implémentation d'installations cobotiques.

Cette recherche comprend deux volets : l'un théorique et axé sur l'étude de plans et l'autre pragmatique et axé sur la réalité du terrain. Le premier volet visait à évaluer la manière dont les fonctions de sécurité du robot, qui transitent par des cartes électroniques dédiées à la sécurité, assurent la protection des opérateurs dans le cadre des quatre modes de fonctionnement collaboratif établis par la norme ISO 10218:2011 : 1) arrêt nominal de sécurité contrôlé, 2) guidage manuel, 3) contrôle de la vitesse et de la distance de séparation, 4) limitation de la puissance et de la force du robot. D'après la norme ISO 13849-1:2015, une fonction de sécurité d'une machine est une fonction dont la défaillance peut provoquer un accroissement immédiat des risques menaçant l'intégrité physique d'une personne. Par exemple, l'arrêt d'urgence sur une machine est une fonction de sécurité. Le second volet de l'étude visait à faire un retour d'expérience sur la prise en compte de la sécurité dans les projets d'intégration de robots collaboratifs au Québec. Ce retour d'expérience a été effectué auprès de trois types de participants : les utilisateurs (donneurs d'ouvrage) de robots collaboratifs, les intégrateurs et les travailleurs concernés.

La partie « théorique » a été menée en analysant la documentation technique de trois robots : un dit « collaboratif » d'origine et deux conventionnels transformés en collaboratifs. De plus, une étude de cas succincte illustre l'implémentation d'une installation cobotique sur la base de l'analyse effectuée. Le volet « terrain » a été réalisé en observant des installations cobotiques dans quatre entreprises et en menant des entrevues semi-dirigées avec les participants concernés.

L'étude de cas du volet théorique a montré que pour sécuriser un mode de fonctionnement collaboratif, il faut, selon le robot, combiner plusieurs fonctions de sécurité. Le volet théorique a notamment révélé que le niveau de performance établi par le fabricant pour un contrôleur dédié à la sécurité n'est pas garant du niveau de performance global de la fonction de sécurité qui y transite. En effet, la carte électronique dont est doté le contrôleur ne remplit que la partie « traitement de signal » des fonctions de sécurité. Ainsi, le donneur d'ouvrage qui fait l'acquisition d'un robot dit « collaboratif » muni d'un contrôleur qui respecte le niveau de performance exigé par la normalisation ne doit pas considérer que les fonctions de sécurité de ce robot respecteront nécessairement les exigences normatives. En effet, il est souvent nécessaire de

compléter la fonction de sécurité du robot en y ajoutant un composant en entrée, tel qu'un dispositif de détection de présence. Les contraintes environnementales peuvent être, dans certains cas, un facteur prépondérant dans le choix du dispositif de détection. Le choix adéquat de ce composant est capital, car si ses performances de sécurité sont inférieures à celles de la partie « traitement », la fonction de sécurité sera moins fiable. Les exigences normatives recommandent des composants dits de sécurité.

Le volet « terrain » de l'étude a démontré que la cobotique en est à ses débuts au Québec. Une seule des quatre entreprises visitées avait une installation cobotique en service. Les trois autres étaient en processus d'intégration. Aussi, d'autres entreprises contactées lors du recrutement pour les visites comptaient acquérir un robot dit « collaboratif » ou réfléchissaient encore à la manière de l'intégrer au processus de production. Les entreprises visitées ont choisi des cobots en raison de : 1) leur faible coût comparé à celui d'un robot conventionnel, 2) le retour rapide sur investissement, 3) la réassignation de tâches plus valorisantes aux travailleurs, 4) la contrainte d'espace, 5) la réduction potentielle des risques pour la santé et la sécurité du travail (SST). Ainsi, selon nos observations, ce n'est pas nécessairement un besoin d'interactions homme-robot en production qui suscite le recours à la cobotique, mais plutôt des motifs économiques, spatiaux et de SST.

Les intégrateurs rencontrés ont confirmé que la conception d'une installation cobotique est une tâche complexe en raison de la nouveauté de la technologie et de ses exigences particulières en matière de sécurisation. L'étape la plus difficile selon eux est l'appréciation des risques. Souvent, elle se limitait à l'identification des risques. Or, pour savoir si un robot peut être utilisé dans un contexte collaboratif, il faut minimalement estimer les risques de l'installation future pour déterminer le niveau de performance minimal requis. Le niveau de performance des fonctions de sécurité doit être égal ou supérieur à ce minimum et en adéquation avec l'analyse des risques associés au fonctionnement collaboratif.

Enfin, pour que la sécurité soit un élément décisif lors de la détermination des besoins et de l'intégration, il est important de l'inclure dans chaque fonctionnalité prévue de l'installation. Cette inclusion doit se faire dans le cadre d'un dialogue étroit entre le donneur d'ouvrage, l'intégrateur et le travailleur. D'après nos observations, le travailleur était peu impliqué dans le processus de détermination des besoins et d'intégration. Compte tenu de cette faible participation du travailleur dans l'appréciation des risques, qui est en soi une étape complexe, il est proposé de conduire des recherches sur la démarche d'appréciation des risques liés à la cobotique, en y intégrant l'analyse de l'activité des travailleurs. De plus, concernant la réduction du risque, certains aspects méritent d'être investigués, notamment : 1) la détection de présence, dans les modes 1 et 3, par des composants qui ne sont pas de sécurité, 2) l'applicabilité et l'acceptabilité des valeurs limites d'effort issues de la spécification technique ISO/TS 15066:2016. En effet, la proximité du travailleur par rapport au robot en production nécessite une évaluation du risque lié à un contact possible. En définitive, les robots dits « collaboratifs » ne riment pas systématiquement avec exemption de moyens de protection. L'appréciation des risques est toujours nécessaire à l'étape d'intégration, comme le spécifient les manuels de fabricants et les normes traitant de cobotique. Selon l'acceptabilité ou non du risque, des moyens de protection pourront être requis.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE	III
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES	IX
AVANT-PROPOS	XI
GLOSSAIRE	XIII
1. INTRODUCTION	1
1.1 État des connaissances sur la robotique collaborative	1
1.1.1 Contexte	1
1.2 Problématique	7
1.2.1 Nouveaux risques envisagés	7
1.2.2 Gestion anticipée des risques	9
1.3 Organisation du rapport	11
2. OBJECTIFS	13
3. VOLET « THÉORIQUE » : ÉVALUATION DES FONCTIONS DE SÉCURITÉ	15
3.1 Méthode	15
3.2 Résultats	21
3.3 Discussion	25
3.3.1 Les spécifications générales.....	25
3.3.2 La réalisation des modes de fonctionnement collaboratif.....	26
3.3.3 Catégories d'arrêt et modes de fonctionnement collaboratif	29
3.3.4 Paramétrage et niveau de performance global	29
3.3.5 Portée et applicabilité des résultats	30
4. VOLET « TERRAIN » : RETOUR D'EXPÉRIENCE	33

4.1	Méthode	34
4.2	Caractéristiques des 4 études de cas.....	34
4.3	L'avant-intégration observée.....	41
4.3.1	Le besoin de robotiser.....	41
4.3.2	Le cahier des charges	43
4.4	Intégration : processus observé	45
4.5	Intégration : difficultés rencontrées	49
4.6	Intégration : mesures de réduction du risque choisies	50
4.6.1	Modes de fonctionnement collaboratif choisis	50
4.6.2	Réflexions sur l'intégration des moyens de protection.....	53
4.7	L'après-intégration observée	57
4.7.1	Documentation issue de l'intégration	57
4.7.2	Bilan de l'entreprise.....	58
4.7.3	Type d'interaction avec le travailleur	58
5.	CONCLUSION.....	61
	BIBLIOGRAPHIE.....	63
	ANNEXE A : PROCESSUS DE REDUCTION DU RISQUE	69
	ANNEXE B : EXEMPLE DE TABLEAU D'ANALYSE DE L'IDENTIFICATION ET DES SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES, PAR FONCTION DE SÉCURITÉ	71
	ANNEXE C : CHRONOGRAMMES DE PRINCIPE CONCERNANT CHAQUE CATÉGORIE (TYPE) D'ARRÊT	73
	ANNEXE D : GRILLE « DONNEUR D'OUVRAGE »	75
	ANNEXE E : GRILLE « INTÉGRATEUR »	83
	ANNEXE F : GRILLE « TRAVAILLEUR ».....	93

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Quantité estimée de robots industriels en opération selon la région géographique par année (IFR, 2015)	1
Tableau 2	Caractéristiques générales des 3 robots étudiés	16
Tableau 3	Liste des fonctions relatives à la sécurité (FRS) par robot et leur contribution aux modes de fonctionnement collaboratif	22
Tableau 4	Classification des fonctions relatives à la sécurité (FRS) énumérées dans les normes ISO 10218:2011 parties 1 et 2 concernant la collaboration homme-robot et identification de celles assurées par les robots étudiés.....	23
Tableau 5	Mise en œuvre des fonctions de sécurité nécessaires à la cellule cobotique de l'exemple, suivant les instructions des différents fabricants étudiés	25
Tableau 6	Survol des études de cas	38
Tableau 7	Description des robots.....	39
Tableau 8	Collaboration homme-robot : tâches exécutées ou prévues par le robot	40
Tableau 9	Collaboration homme-robot : tâches exécutées ou prévues par le travailleur	41
Tableau 10	Facteurs observés expliquant le recours à la robotique, notamment à la cobotique.....	42
Tableau 11	Étapes suivies par les intégrateurs concernant les exigences de l'environnement de travail	46
Tableau 12	Étapes suivies par les intégrateurs concernant les exigences de production	46
Tableau 13	Étapes suivies par les intégrateurs concernant les exigences de sécurité	47
Tableau 14	Difficultés résolues sur le terrain par les intégrateurs.....	49
Tableau 15	Difficultés actuelles ou envisagées sur le terrain par les intégrateurs	50
Tableau 16	Modes de fonctionnement collaboratif utilisés, prévus ou en test dans les entreprises visitées	52
Tableau 17	Impacts positifs de la cobotique selon les témoignages des participants.....	58
Tableau 18	Impacts négatifs de la cobotique selon les témoignages des participants.....	59
Tableau 19	Incidents survenus dans les entreprises visitées.....	59
Tableau 20	Identification de la fonction « Arrêt de protection ».....	71
Tableau 21	Spécifications de la fonction « Arrêt de protection »	71

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Évolution de la robotique des points de vue technologique et normatif (Fryman <i>et al.</i> , 2012).	2
Figure 2	Classification des robots.	3
Figure 3	Exemples de robots industriels (n° 1 à n° 3) et robots de services (n° 3 à n° 8).	5
Figure 4	Méthode adoptée pour l'étude théorique.	15
Figure 5	Exemple de cellule robotique collaborative.	19
Figure 6	Implémentation d'une fonction de sécurité en général.	30
Figure 7	Les participants au volet « terrain ».	33
Figure 8	Vue de dessus de l'application cobotique A ₁	35
Figure 9	Vue de dessus de l'application cobotique B.	35
Figure 10	Vue de dessus de l'application cobotique C.	36
Figure 11	Vue de dessus de l'application cobotique D.	37
Figure 12	Modes de fonctionnement collaboratif et combinaisons systématiques prescrites par la spécification technique ISO/TS 15066:2016.	51
Figure 13	Réduction du risque du point de vue du concepteur (ISO 12100:2010) ¹	69
Figure 14	Explication visuelle d'un arrêt de catégorie 0, tirée de Baudoin et Bello (2015).	73
Figure 15	Explication visuelle d'un arrêt de catégorie 1, tirée de Baudoin et Bello (2015).	74
Figure 16	Explication visuelle d'un arrêt de catégorie 2, tirée de Baudoin et Bello (2015).	74

AVANT-PROPOS

Ce rapport de recherche s'adresse à ceux qui ont fait ou comptent faire l'acquisition d'un robot à des fins de fonctionnement collaboratif en production. Il intéressera également les intégrateurs de ces robots.

Il est conseillé que le lecteur ait des connaissances de base de la norme de conception ISO 13849-1:2015 concernant les parties de systèmes de commande relatives à la sécurité.

Pour faciliter la compréhension du rapport, nous suggérons fortement au lecteur de lire le glossaire qui suit.

GLOSSAIRE

API : automate programmable industriel.

Arrêt de catégorie 0 (cat. 0) : arrêt par suppression immédiate de l'alimentation aux actionneurs de la machine (c'est-à-dire, un arrêt non contrôlé) (CEI 60204-1:2005+A1:2008, section 9.2.2). Voir l'annexe C pour une explication illustrée de cette définition.

Arrêt de catégorie 1 (cat. 1) : arrêt contrôlé en maintenant l'alimentation aux actionneurs jusqu'à l'arrêt de la machine, puis coupure de la puissance quand l'arrêt est obtenu (CEI 60204-1:2005+A1:2008, section 9.2.2). Voir l'annexe C pour une explication illustrée de cette définition.

Arrêt de catégorie 2 (cat. 2) : arrêt contrôlé en maintenant l'alimentation aux actionneurs, et ce, même après que l'arrêt soit complété (CEI 60204-1:2005+A1:2008, section 9.2.2). Voir l'annexe C pour une explication illustrée de cette définition.

Butée logicielle nominale de sécurité (ou butées logicielles nominales de sécurité d'espace et d'axes) : « limite imposée au débatement du robot par un système fondé sur un logiciel ou un microprogramme ayant des performances spécifiées relatives à la sécurité suffisantes. La butée logicielle nominale de sécurité pourrait être le point de déclenchement d'un arrêt ou pourrait garantir que le robot ne se déplace pas au-delà de la limite » (ISO 10218-1:2011).

Catégorie : la notion de catégorie désigne la « classification des parties relatives à la sécurité d'un système de commande liée à leur résistance aux défauts et à leur comportement consécutif à des défauts et qui est obtenue par l'architecture des parties, la détection des défauts et/ou leur fiabilité » (ISO 13849-1:2015). Cette norme désigne 5 catégories par ordre croissant de robustesse : B, 1, 2, 3, 4.

Cellule robotique collaborative (ou cellule cobotique) : espace de travail délimité comportant un robot et les moyens de protection requis pour une application collaborative donnée.

Certification d'incorporation : document officiel conforme à la directive « Machines » 2006/42/CE et visant les quasi-machines. Ces dernières sont des équipements destinés à être incorporés (intégrés) à d'autres équipements ou d'autres quasi-machines, dans le but de constituer une machine à laquelle la directive s'applique. Le document officiel mentionne divers aspects, dont une déclaration dictant les exigences essentielles de la directive ayant été respectées (cf. article B de l'annexe II de la directive 2006/42/CE).

Espace de travail collaboratif : « espace de travail à l'intérieur de l'espace contrôlé, dans lequel le robot et l'humain peuvent réaliser des tâches simultanément pendant le fonctionnement en production » (ISO 10218-2:2011).

FRS (fonction relative à la sécurité) : fonction propre à une SRP/CS (partie d'un système de commande relative à la sécurité) d'une fonction de sécurité (FS) et ayant un niveau de performance (PL) déterminé. Contrairement à une FS, une FRS est une chaîne fonctionnelle incomplète qui, jumelée à d'autres FRS, pourra réaliser une fonction de sécurité.

FS (fonction de sécurité) : « fonction d'une machine dont la défaillance peut provoquer un accroissement immédiat du (des) risque(s) » (ISO 13849-1:2015). Une fonction de sécurité est une chaîne fonctionnelle complète ayant un niveau de performance (PL) et constituée de trois principaux blocs : 1) entrée (ex., capteur), 2) traitement (ex., contrôleur dédié à la sécurité, 3) sortie (ex., préactionneur). Une fonction de sécurité peut être constituée d'une combinaison de fonctions relatives à la sécurité (FRS).

Mode de fonctionnement collaboratif : terme utilisé dans la norme ISO 10218-2:2011 pour désigner le fonctionnement particulier entre une personne et un robot partageant un espace de travail commun. On distingue 4 modes de fonctionnement collaboratif. Chacun de ces modes est associé à des exigences de sécurité. Ces exigences sont présentées dans la norme ISO 10218-1:2011 et détaillées dans la spécification technique ISO/TS 15066:2016. Ces exigences sont également disponibles dans les normes robotiques canadienne et américaine suivantes : CAN/CSA-Z434-14 et ANSI/RIA R15.06-2012. Des similitudes existent entre ces deux normes et la norme ISO 10218:2011- parties 1 et 2. Notamment, la norme canadienne reprend les deux parties de la norme ISO auxquelles des exigences propres au Canada y sont ajoutées.

Opération collaborative : collaboration homme-robot impliquant un ou plusieurs modes de fonctionnement collaboratif (sous-section 5.5.1 de la spécification technique ISO/TS 15066:2016).

PL : la norme ISO 13849-1:2015 définit ainsi la notion du niveau de performance (ou PL pour *performance level*) : « niveau discret d'aptitude de parties [de système de commande] relatives à la sécurité à réaliser une fonction de sécurité dans des conditions prévisibles » (ISO 13849-1:2015). Le PL peut prendre 5 valeurs discrètes allant de la fiabilité la plus faible à la plus robuste : a, b, c, d, e.

PL_r : niveau de performance requis. Le PL_r est déterminé en fonction d'une estimation du risque. Il s'agit du risque duquel la fonction de sécurité protège l'opérateur.

Robot dit « collaboratif » d'origine : cette appellation utilisée dans le rapport désigne tout robot conçu initialement pour interagir directement avec un humain. La collaboration avec l'humain pourra être acceptée selon les résultats d'une appréciation des risques associés à l'installation dans laquelle se trouvera le robot. Quand l'appréciation des risques confirme l'acceptabilité de la collaboration homme-robot ou lorsque ce robot cohabite ou interagit avec l'humain dans une installation industrielle, il est désigné par les termes « robot collaboratif » ou par le mot « cobot » dans le rapport.

SIL : niveau d'intégrité de sécurité (SIL pour *safety integrity level*). La norme CEI 62061:2005 définit ainsi cette notion : « niveau discret (parmi trois possibles) permettant de spécifier les exigences concernant l'intégrité de sécurité des fonctions de commande relatives à la sécurité à

allouer aux SRECS [système de commande électrique relatif à la sécurité], le niveau 3 d'intégrité de sécurité possédant le plus haut degré d'intégrité et le niveau 1 possédant le plus bas ».

SST : santé et sécurité du travail.

SRP/CS : partie d'un système de commande relative à la sécurité (*safety-related part of a control system*). D'après la norme ISO 13849-1:2015, cette partie « répond à des signaux d'entrée et génère des signaux de sortie relatifs à la sécurité ».

Système robotisé : aussi appelé « système de robot industriel » ou « système de robot », c'est un système comprenant : le robot industriel, le(s) terminal(aux) et toutes machines, équipements, dispositifs, axes auxiliaires externes ou capteurs permettant au robot d'accomplir ses tâches (ISO 10218-1:2011).

TMS : trouble musculosquelettique

1. INTRODUCTION

1.1 État des connaissances sur la robotique collaborative

1.1.1 Contexte

1.1.1.1 Parc de robots en augmentation

Chaque année, le parc des robots s'accroît à travers le monde. Le tableau 1 présente la quantité estimée de robots industriels en opération dans plusieurs régions géographiques pour la période 2013-2018. En Amérique du Nord, le parc de robots industriels devrait augmenter de près de 50 % entre 2013 et 2018 (IFR, 2015). Au Canada, la vente de robots a augmenté de 4 % en 2014 (2300 robots vendus) (IFR, 2015). À travers le monde, les secteurs économiques les plus concernés par les robots industriels sont : l'automobile, la fabrication de produits électriques et électroniques, la fabrication de produits en métal, la plasturgie, la chimie et l'alimentaire. Quant au Québec, des statistiques fiables relatives à son parc de robots ne sont pas encore disponibles.

Tableau 1 Quantité estimée de robots industriels en opération selon la région géographique par année (IFR, 2015)

Région géographique	2013	2014	2015*	2018*
Amérique	226 071	248 430	272 000	343 000
Amérique du Nord (Canada, Mexique, É-U)	215 817	236 891	259 200	323 000
Asie/Australie	689 349	785 028	914 000	1 417 000
Europe	392 227	411 062	433 000	519 000
Afrique	3 501	3 874	4 500	6 500
Quantité non spécifiée par pays**	21 070	32 384	40 500	41 500
Total	1 332 218	1 480 778	1 664 000	2 327 000

* Prévisions

** Ventes enregistrées et estimées n'ayant pu être spécifiées par pays

1.1.1.2 Technologie en émergence, nouveau paradigme

En 1961, le premier robot, *Unimate*, faisait son apparition dans l'industrie (Glagowski *et al.*, 1992). Entre 1960 et 2010 (figure 1), le milieu industriel a assisté aux évolutions technologiques et normatives des robots industriels conventionnels. Ces derniers sont séparés physiquement des travailleurs par des protecteurs. Cette séparation vise à assurer la sécurité des travailleurs tout en autorisant de grandes vitesses et de grandes forces aux robots. Dans ces conditions, le risque mécanique était considéré comme une source potentielle de dommages graves, voire mortels. De ce fait, la proximité d'un travailleur par rapport à ces robots n'était acceptée par les normes internationales qu'en mode apprentissage, avec une vitesse réduite maximale du point central de l'outil du robot de 250 mm/s. Selon la norme ISO 10218-1:2011, cette vitesse réduite maximale vise à laisser suffisamment de temps à la personne en danger pour s'échapper, éviter ou arrêter le robot.

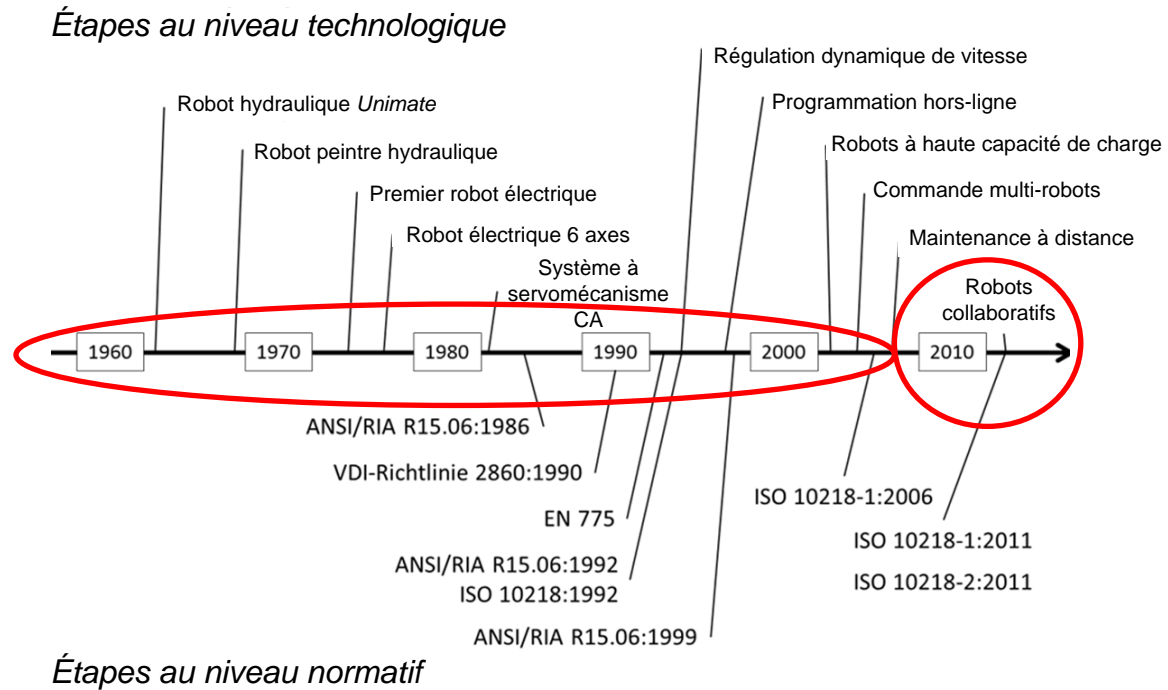


Figure 1 Évolution de la robotique des points de vue technologique et normatif (Fryman *et al.*, 2012).

Grâce aux avancées technologiques (figure 1) favorisant leur autonomie, leur capacité sensorielle, la miniaturisation des régulateurs à microprocesseur et la baisse de leurs coûts, les robots collaboratifs ont fait leur apparition dans l'industrie vers 2010 sous la désignation de « cobots » (Murashov *et al.*, 2016). Cette nouvelle génération de robots est présentée comme ayant l'avantage d'allier la puissance, l'endurance et la précision du robot à la compétence humaine (ISO/TS 15066:2016). L'arrivée de ces nouveaux robots dans l'industrie a déclenché un changement de paradigme en matière de sécurisation. Aujourd'hui, l'interaction et même le contact avec l'humain peuvent être autorisés sous certaines conditions, même pendant la production. La sécurité des opérateurs, intervenant dans des applications collaboratives, est maintenant assurée essentiellement par le système de commande du robot et complétée par ses caractéristiques physiques (ex. : faible inertie, limitation de la force ou de la vitesse, formes non agressives). Le système de commande inclut des cartes ou modules dédiés à la sécurité qui sont reliés à des dispositifs de protection (ex. : capteurs d'effort, détecteurs de présence).

Ces robots représentent une source d'innovation importante pour l'industrie (cf. Futuremag-Arte¹). Matthias *et al.* (2011) mentionnent que le partage d'un même espace de travail par le robot et l'humain confère plus de flexibilité en production (ex., facilité des changements de lots de production). De plus, cette nouvelle génération de robots se démarque par :

- Un coût d'acquisition *a priori* moins élevé.
- Une programmation simplifiée par rapport à la robotique conventionnelle et ainsi, à la portée d'entreprises sans ressource spécialisée à l'interne (ex. : interface homme-machine

¹ <http://www.arte.tv/magazine/futuremag/fr/nos-collegues-les-robots-futuremag>

intuitive, programmation minimale). Cet atout lui confère le qualificatif populaire prêt à l'emploi (*plug-and-play*). Toutefois, ce terme ne traduit pas le fait que ce genre de robots peut nécessiter l'usage de protecteurs selon les résultats de l'appréciation du risque qui aura été effectuée.

- Une configuration qui allie la puissance, l'endurance et la précision du robot à l'intelligence et au pouvoir de décision de l'être humain.

1.1.1.3 Classification des robots et normes de référence

En se basant sur les normes ISO/FDIS 8373:2011, NF EN ISO 13482:2014, ISO 10218:2011 parties 1 et 2, ainsi que sur la spécification technique ISO/TS 15066:2016, l'équipe de recherche a déterminé deux grands groupes de robots: 1) les robots industriels, 2) les robots de service (figure 2).

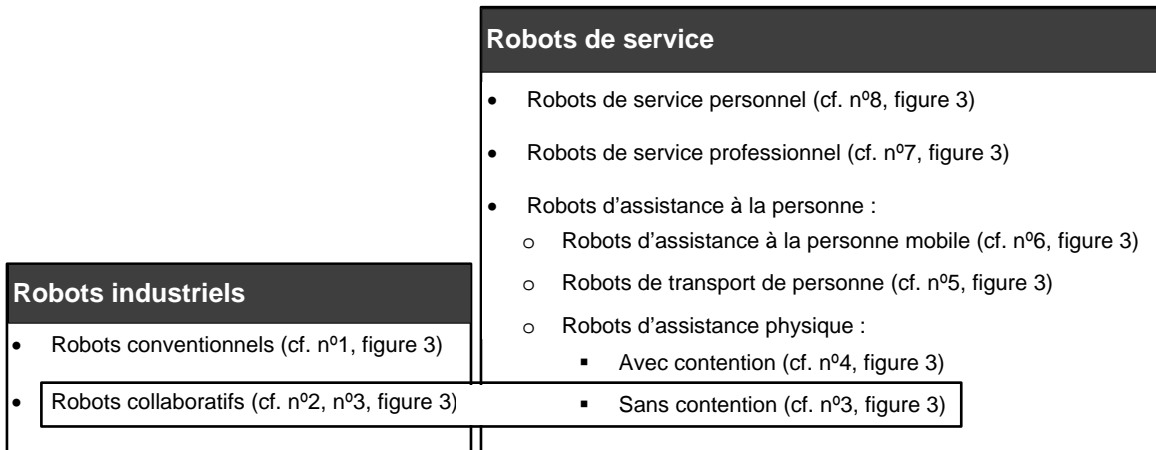


Figure 2 Classification des robots.

Un robot industriel est un « manipulateur à commande automatique, reprogrammable, multiapplications, pouvant être programmé suivant trois axes ou plus, qui peut être fixe ou mobile, destiné à être utilisé dans les applications d'automatisation industrielle » (ISO 10218-1:2011). Cette définition de « robot industriel » inclut les robots utilisés dans un contexte conventionnel comme ceux utilisés dans un contexte collaboratif. Le contexte conventionnel désigne l'usage, en production, d'un robot complètement isolé de l'humain par une enceinte de protection. Le contexte collaboratif désigne l'usage, en production, d'un robot partageant le même espace de travail que l'humain ou interagissant directement avec celui-ci.

Il existe aussi les systèmes d'assistance intelligents (*Intelligent Assist Device* : IAD) qui sont, par conception, des systèmes collaboratifs qui aident le travailleur à déplacer des charges. L'objectif des IAD et des robots collaboratifs à guidage manuel est le même : soulager le travailleur d'une partie de la charge physique liée à la tâche. Les objectifs ultimes de sécurité associés à ces deux dispositifs devraient aussi être les mêmes, c'est-à-dire garantir la sécurité des travailleurs en tout temps. Cependant, leurs classifications sont différentes, car les brevets des IAD sont classifiés internationalement dans la catégorie B66C19/00 - Ponts roulants ou portiques fixes ou mobiles, portant un chariot ou un treuil mobile, alors que les robots peuvent être classés dans la catégorie

B25J9/00 - Manipulateurs à commande programmée. De plus, les IAD sont des dispositifs programmés pouvant comporter un à plusieurs axes pour se mouvoir (Colgate *et al.*, 2003). Quand ils possèdent moins de trois axes, ils ne rentrent définitivement pas dans la catégorie des robots industriels qui, eux, requièrent au moins trois axes d'après la définition citée ci-dessus. Lorsque des IADs possèdent trois axes ou plus, ils peuvent s'apparenter à des cobots à guidage manuel. Toutefois, des différences subsistent entre eux. Par exemple, lorsque l'opérateur relâche l'équipement de guidage manuel du cobot, celui-ci doit exécuter un arrêt nominal de sécurité contrôlé (ISO/TS 15066:2016). En revanche, dans le cas d'un IAD, relâcher l'équipement de guidage manuel peut autoriser l'IAD à se déplacer de manière autonome (Colgate *et al.*, 2003).

Un robot de service est un robot qui exécute des tâches utiles pour les personnes (robot de service personnel). Il peut aussi être destiné à des tâches commerciales (robot de service professionnel). Un robot d'assistance à la personne est un robot de service accomplissant des actions qui contribuent directement à l'amélioration de la qualité de vie des individus, soit en :

- Exécutant des tâches domestiques en interaction avec des individus ou en échangeant de l'information (robot d'assistance à la personne mobile);
- Transportant la personne vers une destination prévue (robot de transport de personne);
- Aidant physiquement un utilisateur à exécuter des tâches requises en complétant ou en augmentant ses capacités personnelles (robot d'assistance physique). Comme le montre la figure 2, les robots d'assistance physique peuvent être avec ou sans contention. Avec contention, le robot est souvent nommé « exosquelette » (cf. n°4 de la figure 3). Sans contention, le robot peut aussi être utilisé en industrie pour assister le travailleur dans sa tâche (ex., le meulage au n°3 de la figure 3). Dans ce cas il s'agit d'un robot industriel. Le même type de robot utilisé hors industrie appartient à la famille des robots d'assistance.

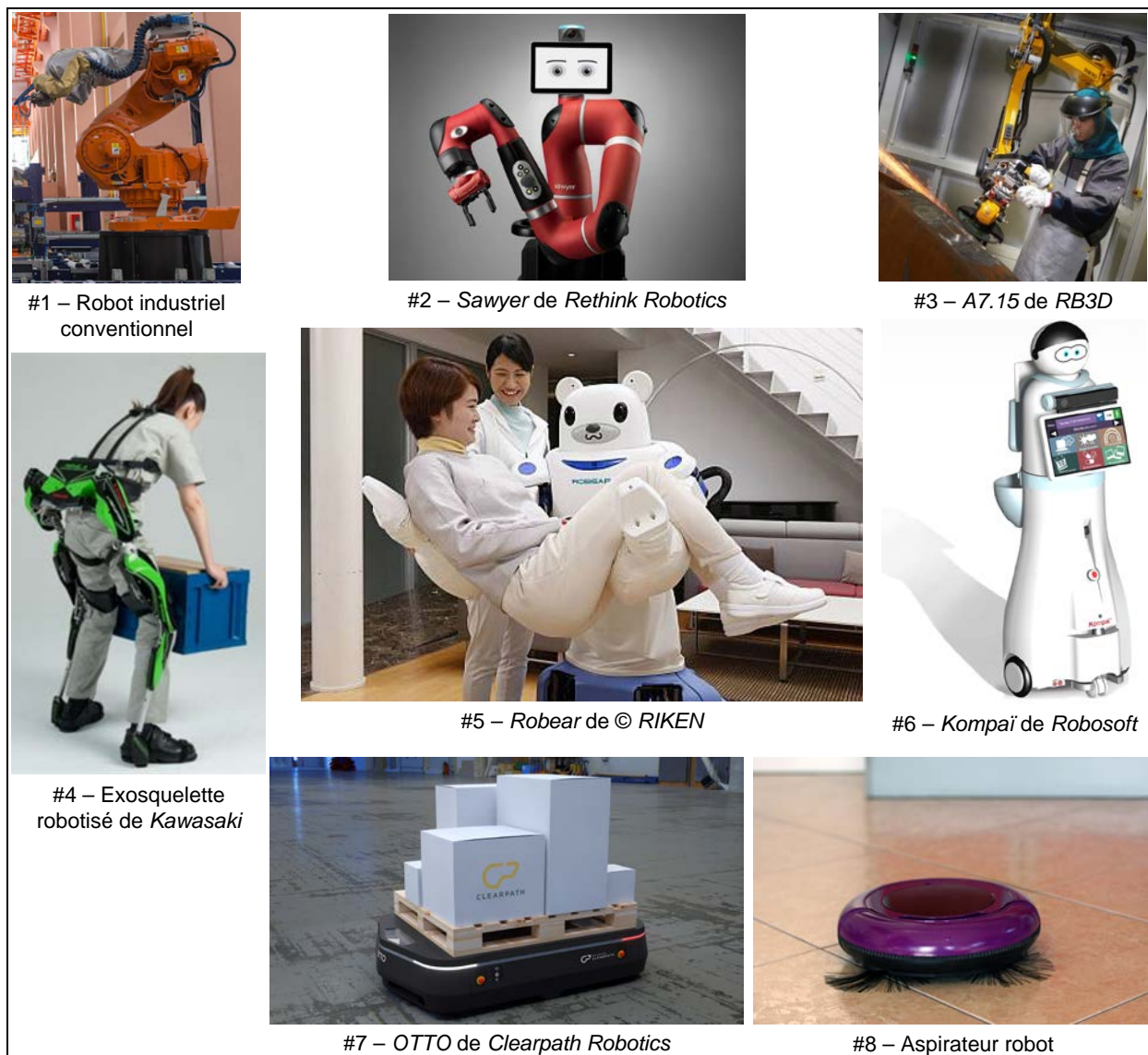


Figure 3 Exemples de robots industriels (n° 1 à n° 3) et robots de services (n° 3 à n° 8).

N.B. Les images présentées à la figure 3 ont été choisies à des fins purement illustratives. Leur choix n'évoque aucune préférence à l'égard d'un fabricant ni d'un modèle. Ces images proviennent des sources suivantes : www.istockphoto.com (n° 1 et n° 8); directement du fabricant (n° 2, n° 6 et n° 7); www.mdp.fr (n° 3); www.robotblog.fr (n° 4); www.riken.jp (n° 5).

1.1.1.4 Modes de fonctionnement collaboratif

Selon la spécification technique ISO/TS 15066:2016, un fonctionnement collaboratif est un état dans lequel un opérateur et un système robotisé, conçu de manière spécifique, travaillent à l'intérieur d'un espace collaboratif. Toujours selon ce document, un fonctionnement collaboratif peut avoir lieu en appliquant les exigences de sécurité associées à un, ou à une combinaison, des quatre modes de fonctionnement collaboratif suivants :

1) L'arrêt nominal de sécurité contrôlé

Dans ce mode, l'interaction homme-robot se fait alors que le robot est à l'arrêt. Il s'agit d'un arrêt de protection de catégorie 0 ou 1 (cf. Glossaire) déclenché une fois l'opérateur détecté dans l'espace de travail collaboratif. À défaut d'être un arrêt de catégorie 0 ou 1, l'arrêt de protection peut aussi être un arrêt surveillé de catégorie 2 (cf. Glossaire) succédant à une décélération du robot. Dans ces situations, l'opérateur peut, par exemple, travailler sur une pièce transportée par le robot. Ce dernier peut redémarrer automatiquement, une fois que l'opérateur quitte l'espace de travail collaboratif.

2) Le guidage manuel

Les intentions de mouvement de l'opérateur sont transmises au système de commande du robot, grâce à un équipement de guidage manuel manipulé par l'opérateur. L'équipement de guidage est placé près du terminal du robot ou directement sur le terminal. Cet équipement comporte un dispositif d'arrêt d'urgence et un dispositif de validation. Dans ce mode, le système robotisé peut comprendre une fonction servant à découpler la force de l'opérateur pour réduire sa charge physique (ex., tâche de meulage au n° 3 de la figure 3).

3) Le contrôle de la vitesse et de la distance de séparation

Dans l'espace de travail collaboratif, le robot évite constamment l'opérateur en maintenant une vitesse et une distance de séparation déterminées. Cela a pour but de prévenir les collisions entre le robot et l'opérateur. Ce contrôle se fait en temps réel. La vitesse maximale et la distance minimale de séparation peuvent être variables ou constantes.

4) La limitation de la puissance et de la force du robot

Un contact physique peut survenir entre l'opérateur et le robot, de manière volontaire ou non. La puissance et la force du robot peuvent être limitées intrinsèquement par ses caractéristiques physiques ou par son système de commande relatif à la sécurité.

Une appréciation des risques suggérera les valeurs sécuritaires de vitesse d'opération du robot, de distance de séparation, de puissance ou de force, selon le mode de fonctionnement collaboratif utilisé. Les exigences de sécurité associées à chacun de ces modes sont détaillées dans le document de spécification technique ISO/TS 15066:2016.

Quel que soit le mode de fonctionnement collaboratif, il est nécessaire d'arrêter le robot afin de garantir la sécurité de l'opérateur quand certaines conditions ne sont plus respectées, par exemple : lorsque le robot sort d'un espace de travail prédéfini, lorsque la vitesse déterminée par l'appréciation des risques n'est plus respectée ou lorsque le robot bouge dans des situations où il doit être immobile. Les fonctions qui arrêtent le robot lors de la violation de ces conditions sont des fonctions de surveillance incluses dans les fonctions d'arrêt. Ces fonctions de sécurité doivent répondre à des exigences de fiabilité définies par les normes (ex., ISO13849-1:2015).

Il ne faut pas confondre les fonctions de sécurité avec les fonctions standards. Ces dernières, aussi appelées « fonctions de commande standards », sont présentes pour contribuer au fonctionnement de la machine en mode de production ou de réglage et ne répondent généralement pas à des exigences de fiabilité relatives à la sécurité (Baudoin et Bello, 2010).

1.2 Problématique

1.2.1 Nouveaux risques envisagés

Selon plusieurs études, la robotique collaborative génère de nouveaux risques par rapport à la robotique conventionnelle (Murashov *et al.*, 2016; Charpentier et Sghaier, 2013) :

- Risques de collisions : puisque l'humain n'est plus isolé de la zone de travail du robot, il peut être à proximité ou même en contact avec le robot.
- Risques de troubles musculosquelettiques (TMS) : même si le robot est conçu pour réduire les risques de TMS en soulageant le travailleur de tâches répétitives, il reste que le fonctionnement collaboratif du robot peut être source de TMS à long terme (ex., TMS due à une modification répétée de stratégie de mouvement et de posture du travailleur par appréhension d'un contact). Le risque de TMS s'est avéré fondé dans l'étude d'Atain Kouadio et Sghaier (2015) : durant une période d'essai de 10 mois de l'A7.15 (cf. figure 3, n° 3), les travailleurs collaborant avec ce robot ont éprouvé des douleurs aux poignets. Les « problèmes constatés sur le maintien de la poignée de validation pour activer le cobot illustrent les probabilités de déplacement de la problématique TMS d'une partie à une autre de l'appareil locomoteur » (Atain Kouadio et Sghaier, 2015).
- Risques psychosociaux : la vitesse à laquelle le robot collabore peut correspondre à une cadence de production inadaptée pour l'opérateur. Le travail dans une cellule robotique collaborative peut générer une surcharge mentale pour l'opérateur. En effet, ce dernier n'est plus concentré uniquement sur la réalisation de sa tâche, mais aussi sur l'anticipation et la synchronisation constantes de ses mouvements par rapport au robot.

Lorsque l'on parle de nouveaux risques liés à la cobotique, cela ne signifie pas uniquement de nouveaux phénomènes dangereux ou de nouveaux dommages envisagés. Cela signifie aussi que des dommages liés à la robotique conventionnelle hors production, comme les blessures par collision, sont maintenant présents en tout temps, y compris lors de la production. La fréquence et la durée d'exposition aux mouvements du robot collaboratif contribuent à augmenter la possibilité de collisions et donc la probabilité d'un dommage.

L'utilisation des robots collaboratifs étant relativement récente, il est pour l'instant difficile d'obtenir un historique d'accidents associés à ces machines. De plus, aucune statistique d'accidents liés aux robots conventionnels dans les milieux de travail québécois n'a été trouvée. En effet, les données liées aux robots sont intégrées à celles des machines d'assemblage, selon le système de codage utilisé par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST), car le terme « robot » n'existe pas dans le manuel de codage utilisé.

Malgré la rareté des rapports d'accidents liés aux robots conventionnels (Malm *et al.*, 2010; Gray *et al.*, 1992), des auteurs comme Charpentier et Sghaier (2012), Malm *et al.* (2010) ont pu en analyser. Ces analyses ont été effectuées afin de caractériser les situations accidentelles, puis de proposer des moyens de réduction du risque pour la conception de robots dits « collaboratifs » d'origine et la mise en œuvre d'applications collaboratives. Pour ce faire, les auteurs ont appliqué ces situations accidentelles à la réalité collaborative. Par exemple, Malm *et al.* (2010)

ont constaté que 23 accidents parmi les 25 retenus résultaient d'écrasements de parties corporelles entre le robot et un objet rigide. Ils ont donc souligné qu'avec la croissance de l'interaction homme-robot, l'humain est appelé à subir davantage ce type de dommage. Pour pallier ce problème, ils suggèrent que les systèmes de détection de collisions aient un temps de réaction court afin d'éviter ou de réduire l'impact d'un dommage. Charpentier et Sghaier (2012) ont examiné 31 accidents graves ou mortels liés aux robots conventionnels. Il est surprenant de constater dans leur étude que, contrairement à la croyance générale dans le domaine de la sécurité des machines voulant que les accidents se produisent principalement lors de la maintenance, près des 2/3 de ces accidents (20/31) surviennent lors d'activités de production. Les activités de maintenance relatives aux accidents analysés concernaient notamment le nettoyage et la réparation. Ces accidents étaient majoritairement des amputations (21/31), tandis que huit décès ont été recensés. Les sièges de lésions les plus représentés étaient le tronc (9 cas) et la tête (5 cas). Ces accidents ont le plus souvent eu pour cause un accès aux parties mobiles du robot en raison d'un protecteur ou d'un dispositif de protection qui a été contourné (10/31) ou qui était inadapté à l'utilisation du robot (10/31). À la lecture de ces dernières données, il paraît donc essentiel de bien analyser l'usage futur du robot afin que les moyens de réduction du risque prévus correspondent à son usage réel.

Une étude prospective (Atain Kouadio *et al.*, 2014) pour imaginer l'utilisation future (horizon 2030) des robots collaboratifs et d'assistance physique dans les milieux de travail a été réalisée conjointement par différents organismes en France : l'Institut national de recherche et de sécurité en France (INRS), l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES), la Caisse centrale de la mutualité sociale agricole (CCMSA), le Centre d'expertise nationale en robotique (CENRob), le Centre technique des industries mécaniques (CETIM) et la Commission des accidents du travail et des maladies professionnelles (CAT-MP). Selon des contextes politique, économique et social différents, l'étude énumère quatre scénarios futurs possibles d'utilisation de ces robots : pour deux d'entre eux, on constate que l'utilisation de ces robots se limite principalement à deux secteurs : le nucléaire et le domaine militaire; tandis que pour les deux autres, on assiste à l'essor de cette nouvelle technologie dans de nombreux domaines : industrie des procédés, industrie manufacturière, secteur médical, aide à la personne, domaine militaire. Les auteurs de l'étude se sont projetés vers l'avenir pour prévoir les effets de la robotique collaborative (ou cobotique) dans le cas des scénarios où cette technologie est en plein essor. De nombreux avantages sont associés à la cobotique, tels que l'allègement des contraintes biomécaniques et de la charge physique du travailleur, ainsi que le maintien en emploi des personnes vieillissantes. Les risques qui y sont associés sont ceux cités plus tôt. Les auteurs insistent toutefois sur les risques de heurt, d'écrasement et d'étouffement qui prédominent dans le cas de la coactivité homme-robot. Avec l'évolution croissante des technologies, les robots auront la capacité de se déplacer plus rapidement ce qui peut « augmenter les risques de collision et leur dangerosité » (Atain Kouadio *et al.*, 2014). En outre, « le développement plus abouti [de ces robots] peut avoir paradoxalement pour résultat d'accroître certains risques comme l'exposition aux champs magnétiques renforcés par l'augmentation de l'énergie embarquée. Cette même énergie embarquée peut majorer les risques d'incendie et d'explosion » (Atain Kouadio *et al.*, 2014). Les auteurs renchérissent en avançant qu'un « développement important de l'utilisation [de ces robots] peut fragiliser la société tout entière en raison de pertes de contrôle, liées notamment à des risques de piratage informatique (*hacking*) ou à la cybersécurité (Atain Kouadio *et al.*, 2014). En effet, les nouvelles gammes de

robots collaboratifs peuvent dorénavant communiquer à distance par le web. Ce genre de communication est « utile aux agents de maintenance, qui pourront intervenir sur la machine à distance ou limiter les allers-retours en faisant un prédiagnostic » (Parisot, 2014). Les installations industrielles devenant maintenant des cibles à part entière (Pietre-Cambacedes *et al.*, 2015), il est logique de penser que les robots collaboratifs le deviendront aussi.

Cette communication à distance est possible par le fait que le robot collaboratif soit devenu un objet connecté. Il entre donc dans la catégorie de l'internet des objets. Les données provenant de ses capteurs communicants sont enregistrées afin de réguler la production à distance, par exemple. Le robot collaboratif fait donc partie d'un système cyberphysique (Schubert, 2015). L'internet des objets, qui existe depuis une vingtaine d'années déjà (Mraz, 2016), ainsi que les systèmes cyberphysiques constituent les fondements de l'industrie 4.0. Le gouvernement allemand, à l'origine du terme « industrie 4.0 », définit une telle industrie comme étant :

- numérique;
- capable de générer partiellement ou entièrement une « réplique virtuelle » (Gimélec, 2013) de sa chaîne de production;
- économe en énergie et en matières premières;
- flexible.

L'usage d'un robot collaboratif contribue à la flexibilité de l'industrie. Par exemple, par le fait qu'il soit facilement reprogrammable par apprentissage selon le lot de production désiré. Toutefois, il faut savoir qu'un changement de production peut créer de nouvelles situations dangereuses qu'il faudra considérer dans l'appréciation du risque du poste de travail.

1.2.2 Gestion anticipée des risques

Face aux risques potentiels de la cobotique en matière de SST, plusieurs recherches dans différents domaines ont été menées. Voici des exemples visant l'amélioration de la conception de robots destinés à de la collaboration ou traitant de l'encadrement de leur conception, afin qu'ils soient plus sécuritaires pour l'opérateur :

- **Ergonomie cognitive** avec 1) l'amélioration de l'anticipation des mouvements du robot pour rendre la collaboration plus intuitive, donc plus sécuritaire, 2) l'optimisation de la collaboration en la rendant plus fluide :
 - développement d'un planificateur de tâches du robot lui conférant une autonomie décisionnelle, afin qu'il produise et exécute des comportements socialement acceptables (Montreuil, 2009);
 - planification des réactions (ex. simulation d'émotions) et des gestes du robot en réaction au comportement humain (Sidobre *et al.*, 2012; Buiu et Popescu, 2011; Kondo *et al.*, 2010);
 - traits sociaux de l'interaction homme-robot (de Graaf et Ben Allouch, 2013; Moller *et al.*, 2011; Mumm et Mutlu, 2011);
 - exploitation de la réalité virtuelle pour étudier le comportement humain lors d'interactions avec un robot (DGUV, 2013). Les conclusions tirées de ces mises en

situation indiquent, par exemple, qu'une vitesse élevée du robot augmente la charge de travail de l'opérateur, ainsi que son anxiété, surtout lorsque la distance entre le robot et l'opérateur est faible. Ces conclusions suggèrent d'éviter des vitesses élevées pour la collaboration homme-robot;

- démonstration des attributs de la réalité augmentée à faciliter l'implémentation d'un environnement plus propice à de la collaboration homme-robot (Green, 2008);
 - développement d'un système d'assistance capable de détecter, de manière autonome, les situations où l'opérateur a besoin d'aide pour réaliser sa tâche (Baraglia *et al.*, 2016).
- **Cinétique** des parties mobiles du robot : le développement d'une technique permettant aux articulations robotiques d'assurer à l'humain une sécurité intrinsèque accrue face aux collisions statiques² avec le robot (Ahmed et Kalaykov, 2010), le développement de techniques de programmation par apprentissage (Rozo *et al.*, 2016). Il existe également une étude sur l'amélioration d'un bras robotisé par l'ajout de muscles artificiels pneumatiques (Shin *et al.*, 2010). Des simulations du fonctionnement du bras ont permis d'en valider les aspects de sécurité pour l'humain.
 - **Analyse du risque** : une méthode d'estimation de la gravité du dommage et de la probabilité du dommage (Fujikawa et Kubota, 2012), un aide-mémoire de conception sécuritaire du poste de travail collaboratif concernant l'aspect organisationnel (Ikeda *et al.*, 2012), le développement d'un outil d'estimation du risque SST à l'étape de conception des robots dits « collaboratifs » d'origine (Matthias *et al.*, 2011).
 - **Biomécanique** : la détermination de vitesses et d'efforts réduits, le calcul de seuils de douleur de l'humain (Falco *et al.*, 2012; Fujikawa et Kubota, 2012; Kubota et Fujikawa, 2012; Haddadin *et al.*, 2007), le développement d'appareils de mesure de force et de pression maximales lors de collisions avec un robot pour assister l'appréciation des risques liés à ces machines avant la conception du poste de travail (Huelke et Ottersbach, 2012).
 - **Capteurs** : l'amélioration et la conception de systèmes de détection de présence (Fritzsche *et al.*, 2011; Haddadin *et al.*, 2011).
 - **Fiabilité** des parties de systèmes de commande relatives à la sécurité : un aide-mémoire de conception sécuritaire du poste de travail collaboratif concernant l'aspect « sécurité fonctionnelle » (Ikeda *et al.*, 2012).

Compte tenu de tous ces aspects et du fait que le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) du Québec aborde l'accès à la zone dangereuse d'une machine en fonctionnement (ex., article 182, 2°), mais pas le partage d'un espace de travail homme-machine, il nous paraît pertinent d'anticiper les risques relatifs aux robots collaboratifs installés au Québec pour agir en amont (Gouvernement du Québec, 2016). Comme le disent Murashov *et al.* (2016), se pencher sur la sécurité des travailleurs interagissant avec ce genre de machines demeure nécessaire avant qu'un grand nombre de robots présentant un risque pour les travailleurs soient installés dans les milieux de travail. Ce projet de recherche permettra d'émettre de premières recommandations en

² Ahmed et Kalaykov (2010) définissent une collision statique comme étant une situation où l'outil en mouvement du robot heurte l'humain à une vitesse inférieure à 200 mm/s.

matière de sécurité au travail, concernant l'interaction homme-robot dans un contexte collaboratif. En outre, elle permettra de jeter les bases pour susciter les réflexions qui ouvriront la voie vers de futures avenues de recherche. Enfin, il faut noter que la spécification technique ISO/TS 15066:2016 a été publiée lors de la réalisation de cette recherche, ce qui explique que ce rapport ne s'appuie pas sur le contenu détaillé de cette spécification.

1.3 Organisation du rapport

La suite du rapport comprend quatre chapitres :

- Le chapitre 2 résume les objectifs de la recherche. Le premier objectif dit « théorique » vise à évaluer les fonctions de sécurité présentes sur un échantillon de robots collaboratifs. Le second objectif dit « terrain » entend, par un retour d'expérience auprès des travailleurs, utilisateurs et intégrateurs de ce type d'équipement, évaluer la prise en compte de la sécurité dans les projets d'intégration en robotique collaborative;
- Le chapitre 3 présente le volet théorique avec la méthode suivie, les résultats qui en découlent et une discussion;
- Le chapitre 4 détaille le volet « terrain ». Tout comme pour le volet théorique, on y retrouve la méthode associée et les résultats accompagnés d'une discussion;
- Le chapitre 5 est une conclusion synthétisant les résultats, les recommandations et l'orientation des recherches futures.

2. OBJECTIFS

Ce projet de recherche concerne les robots industriels utilisés dans un contexte de collaboration homme-robot. Les robots dits « collaboratifs » d'origine, tout comme les robots conventionnels transformés en collaboratifs ont été considérés. L'objectif général de ce projet est d'émettre des recommandations en matière de sécurité au travail concernant la mise en œuvre de robots dans un contexte collaboratif et de formuler des pistes de réflexion en vue d'outiller les intervenants au regard de l'implémentation d'installations cobotiques.

L'étude comporte deux volets portant sur la sécurité de ces robots : un volet théorique suivi d'un volet « terrain ». Ces deux volets permettent de répondre, respectivement, aux deux objectifs spécifiques ci-dessous :

- 1) Évaluer la manière dont les fonctions de sécurité de robots présentes sur les cartes électroniques ou modules dédiés à la sécurité assurent la protection des opérateurs dans le cadre des modes de fonctionnement collaboratif;
- 2) Faire un retour d'expérience, auprès des utilisateurs (c.-à-d., acquéreurs ou donneurs d'ouvrage) de robots collaboratifs, des intégrateurs et des travailleurs concernés, sur la prise en compte de la sécurité dans les projets d'intégration en robotique collaborative, notamment :
 - les défis relevés et les problèmes vécus par les donneurs d'ouvrage et les intégrateurs en robotique collaborative;
 - les risques en matière de santé et de sécurité du travail (SST) et les avantages associés à cette technologie pour les travailleurs.

L'étude théorique a été menée par l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) au Québec et l'INRS en France, dans le cadre d'une entente de collaboration en « Sécurité des machines ». L'étude « terrain » a été réalisée par les chercheurs de l'IRSST au Québec.

L'étude proposée se démarque de celles citées à la sous-section 1.2.2 par le fait que :

- Le volet théorique est axé sur l'intégration des fonctions de sécurité de robots industriels utilisés pour collaborer avec l'humain dans les milieux de travail, plutôt que sur leur conception. Elle suscite de premières réflexions permettant d'accompagner l'intégrateur dans sa démarche de mise en œuvre d'une cellule cobotique ;
- Le volet « terrain » met l'accent sur des cas d'intégration et d'utilisation vécus en entreprises, plutôt que sur une étude en laboratoire portant sur la conception. En effet, le retour d'expérience de l'utilisateur est primordial pour améliorer la conception de toute machine. D'ailleurs, la figure 13 issue de la norme ISO 12100:2010 (cf. annexe A) montre l'importance du retour d'expérience (apport de l'utilisateur) dans le processus de réduction du risque. Ainsi, faire remonter l'information au concepteur et à l'intégrateur quant à l'usage d'une machine permet d'en améliorer non seulement la conception sécuritaire, mais aussi celle des futurs postes de travail.

3. VOLET « THÉORIQUE » : ÉVALUATION DES FONCTIONS DE SÉCURITÉ

Ce volet théorique consiste à évaluer la manière dont les fonctions de sécurité (FS) de robots présentes sur les cartes électroniques ou modules dédiés à la sécurité assurent la protection des opérateurs dans le cadre des modes de fonctionnement collaboratif à mettre en œuvre.

La norme ISO 10218-1:2011 exige une fiabilité élevée des fonctions de sécurité utilisées pour le fonctionnement collaboratif : niveau de performance PL d avec des exigences de sécurité correspondant à celles de la catégorie 3, telles que définies dans la norme ISO 13849-1:2015. Pour atteindre ce niveau de performance, plusieurs fabricants proposent une carte électronique indépendante ou intégrée d'origine sur le contrôleur du robot (carte dédiée à la sécurité). Sinon, ils proposent un bloc disposé dans le boîtier de contrôle du robot (module dédié à la sécurité), généralement compatible avec une large gamme de robots. Ces cartes ou modules dédiés à la sécurité sont à double cœur afin de réaliser des calculs de manière redondante. De nombreuses fonctions de sécurité associées au fonctionnement collaboratif du robot sont gérées par ces cartes ou modules. Une carte ou module dédié à la sécurité est généralement connecté à des dispositifs de protection électro-sensibles et reçoit les informations issues des mesures des capteurs du robot (ex., ceux liés aux actionneurs du robot), ainsi que des consignes du contrôleur de celui-ci. La carte surveille les informations selon la logique prévue et fournit un arrêt de protection en cas de violation d'une règle de sécurité (ex., violation de limite due au dépassement d'une vitesse ou dépassement de l'espace de travail).

Ces cartes aux logiques de traitement complexes sont relativement opaques pour les utilisateurs finaux qui font face à un manque de recommandations et de documentation sur le sujet. C'est dans ce contexte que nous poursuivons l'objectif de l'étude théorique en appliquant la méthode décrite à la sous-section 3.1.

3.1 Méthode

La figure 4 illustre la démarche suivie pour l'étude théorique. Elle comporte 5 étapes.

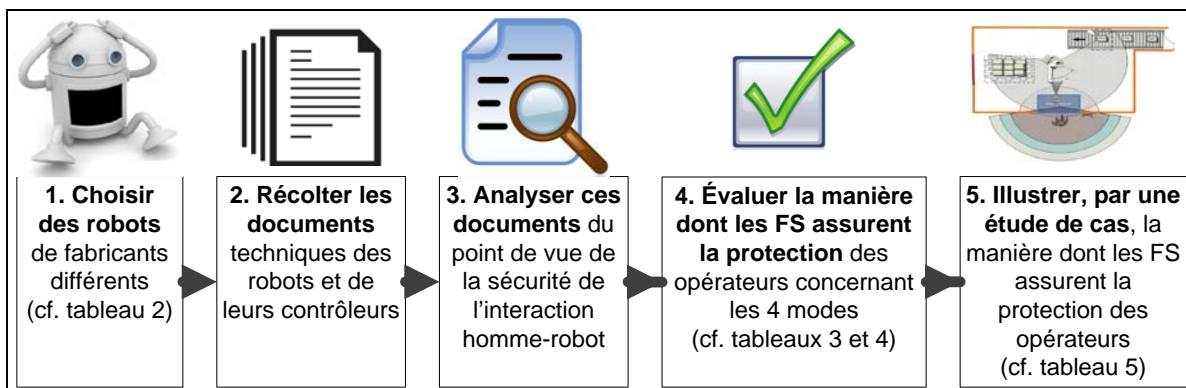


Figure 4 Méthode adoptée pour l'étude théorique.

Étape 1

Trois robots issus de trois fabricants différents ont été retenus pour l'étude. Le tableau 2 présente leurs caractéristiques : spécifications techniques générales et données de performance. Ces trois robots ont été retenus en raison du fait que leurs fabricants figuraient parmi les plus populaires dans le secteur industriel en 2014, lors du début des travaux, et ce, à l'échelle internationale. Opter pour le choix de trois robots ne nous permet évidemment pas d'être exhaustifs. En effet, le nombre de fabricants proposant des robots collaboratifs s'est vu multiplié et spécialement lors de la fin de l'étude. Le but d'un tel choix est de pouvoir illustrer au lecteur quelques points de vigilance concernant la mise en œuvre de cellule robotique collaborative à travers des exemples concrets de robots. D'autre part, ce choix préparait davantage l'équipe de recherche pour l'étude « terrain » où, effectivement, deux des entreprises visitées possédaient l'un des trois robots étudiés théoriquement.

Au moment du choix des robots, l'un des fabricants populaires ne concevait et ne vendait que des robots dits « collaboratifs » d'origine. Les deux autres fabricants n'avaient pas encore mis sur le marché de tels robots. Ils vendaient de préférence des robots conventionnels pouvant être transformés en collaboratifs. Cela explique le type de robots étudiés (cf. tableau 2). Par souci de confidentialité, les marques des robots ne sont pas citées dans ce rapport. Dans le même ordre d'idée, les caractéristiques quantitatives des robots, telles que la vitesse et la charge utile, sont représentées par des seuils tout en préservant leur ordre de grandeur.

Tableau 2 Caractéristiques générales des 3 robots étudiés

	Robot n° 1	Robot n° 2	Robot n° 3
Type de robots	Dit « collaboratif » d'origine	Conventionnel transformé en collaboratif	Conventionnel transformé en collaboratif
Nombre d'axes	6	6	6
Charge utile	>3 kg	>3 kg	>15 kg
Portée	>700 mm	>800 mm	>1 000 mm
Vitesse max. (axe)	>170 °/s	>710 °/s	>330 °/s
Contrôleur	Dédié au robot	Utilisation d'un contrôleur compatible	Dédié au robot
Carte ou module dédié à la sécurité	Carte d'origine	Module à intégrer	Carte à intégrer
Conformité des FS (<i>ISO 13849-1:2015</i> ou <i>CEI 62061:2005</i>)	Catégorie 3, PL d	- Catégorie 4, PL e : arrêt d'urgence du pendant - Catégorie 3, PL d : autres	Catégorie 3, PL d
Accès et modifications des paramètres de sécurité	Mot de passe obligatoire pour autoriser les modifications liées à la configuration de sécurité (détermination des limites de position, de vitesse, d'effort, etc.).		
Marquage CE (2006/42/CE)	Certification d'incorporation	Aucun	Certification d'incorporation

Étape 2

Les documents techniques recensés étaient des manuels de maintenance, manuels de l'utilisateur et des plans électriques généraux d'interconnexions entre le contrôleur et le robot. Ces deux derniers types de documents renseignaient sur les entrées et sorties des cartes et modules dédiés à la sécurité, ainsi que sur leur fonctionnement. Les documents provenaient du site web du fabricant, sinon ils étaient obtenus par l'entremise d'un distributeur.

La documentation technique était plus abondante pour le robot n° 3 que pour les robots n° 1 et n° 2. L'accès au personnel technique du n° 3 était plus facile que pour les deux autres robots. Ainsi, l'équipe de recherche a pu profiter de l'accès au fabricant du troisième robot et de son distributeur pour obtenir toute la documentation et l'assistance requises.

Étape 3

Un tableau d'analyse (cf. annexe B) a été réalisé à partir de l'information contenue dans les documents rassemblés. Ce tableau est inspiré du tableau 3.2 de Jocelyn (2012) utilisé pour analyser la fonction d'arrêt et d'empêchement du mouvement de fermeture du plateau mobile d'une presse à injection de plastique lors de l'ouverture du protecteur par l'opérateur. Le tableau de l'annexe B sert de base commune de comparaison des spécifications techniques et critères de performance des fonctions de sécurité pouvant être implémentées. Ces spécifications et critères caractérisent chaque fonction de sécurité et peuvent guider le choix des composants ou paramètres à configurer pour la réaliser. Par exemple, le temps de réaction de la fonction d'arrêt de protection présentée en annexe B permettra de calculer la distance de sécurité requise pour s'assurer que le phénomène dangereux (ex., le robot en mouvement) soit éliminé avant que le travailleur atteigne la zone dangereuse. De plus, selon les contraintes spatiales, le temps de réaction peut guider le choix de la vitesse de fonctionnement du robot, ainsi que du dispositif de détection de présence capable d'assurer un arrêt dans les temps requis.

Dans le cadre de l'analyse, les plans techniques disponibles des fonctions de sécurité ont été réduits à des schémas-blocs simplifiés afin d'en faciliter la lecture et la compréhension. Les schémas-blocs sont exclus du rapport pour préserver l'anonymat des fabricants. Chaque schéma-bloc illustre la chaîne complète de la fonction de sécurité : l'entrée, le traitement et la sortie. Les schémas-blocs ont permis de constater que toutes les fonctions de sécurité transitent sur une même carte ou module dédié à la sécurité et agissent sur la même sortie : les freins du robot. En revanche, elles ont des entrées différentes telles qu'un bouton d'arrêt d'urgence, un dispositif de détection de présence, etc. Ces constatations ont permis de compléter les tableaux d'analyse des fonctions de sécurité.

Étape 4

Des tableaux récapitulatifs (cf. le tableau 3 et le tableau 4) sont issus de l'analyse. Ils permettent d'évaluer la manière dont les fonctions de sécurité réalisables assurent la protection des opérateurs en relation avec les quatre modes de fonctionnement collaboratif du robot. Comme cela est expliqué plus loin, les fonctions de sécurité étudiées sont souvent le fruit d'une combinaison de fonctions relatives à la sécurité. Ces dernières sont disponibles sur la carte ou le module dédié à la sécurité.

Étape 5

L'étude de cas présentée à la figure 5 sert d'exemple pour illustrer la manière dont les fonctions de sécurité identifiées assurent la protection des opérateurs dans le cadre d'une collaboration homme-robot. Elle consiste en l'implémentation d'une cellule robotique collaborative. Cet exemple n'est pas exhaustif, mais il permet de mettre en situation un cas de collaboration illustrant la mise en œuvre des fonctions de sécurité proposées par les fabricants afin de sécuriser une cellule cobotique. Cette étude de cas montre que la collaboration homme-robot ne se limite pas forcément à l'usage d'un seul mode de fonctionnement. La collaboration homme-robot n'exige pas non plus l'usage des quatre modes de fonctionnement collaboratif pour une même application. Cette étude de cas montre plutôt que selon les résultats de l'appréciation des risques associés aux tâches prévues pour l'installation cobotique, un ou plusieurs des quatre modes peuvent être requis pour assurer la sécurité de l'opérateur.

L'exemple illustre une cellule de contrôle-qualité et de palettisation. Ce poste de travail consiste à contrôler automatiquement la qualité de pièces acheminées mécaniquement vers un poste robotisé de palettisation. Si un défaut est constaté, une opération de correction faite par un opérateur est nécessaire avant la palettisation. Cette opération de correction de défauts nécessite que le robot maintienne la pièce immobile pendant l'intervention humaine. Cette opération est la tâche collaborative en question.

La cellule prise en exemple comporte trois postes :

- 1. Un poste de contrôle et de déchargement :** ce poste est équipé d'un détecteur utilisé pour arrêter le convoyeur lors de la présence d'une pièce. Il est également équipé d'un système de contrôle de qualité des pièces (par vision, par exemple).
- 2. Un poste de palettisation :** sur ce poste, il y a une palette initialement vide. Celle-ci est remplie au fur et à mesure que le robot y achemine des pièces depuis le poste de déchargement.
- 3. Un poste de correction de défauts :** c'est le poste collaboratif. Dans certains cas, un opérateur peut y corriger manuellement les défauts présents dans la pièce (ex., fixer une vis manquante) pendant que le robot la maintient immobile. Dans d'autres cas, la pièce est enlevée par l'opérateur.

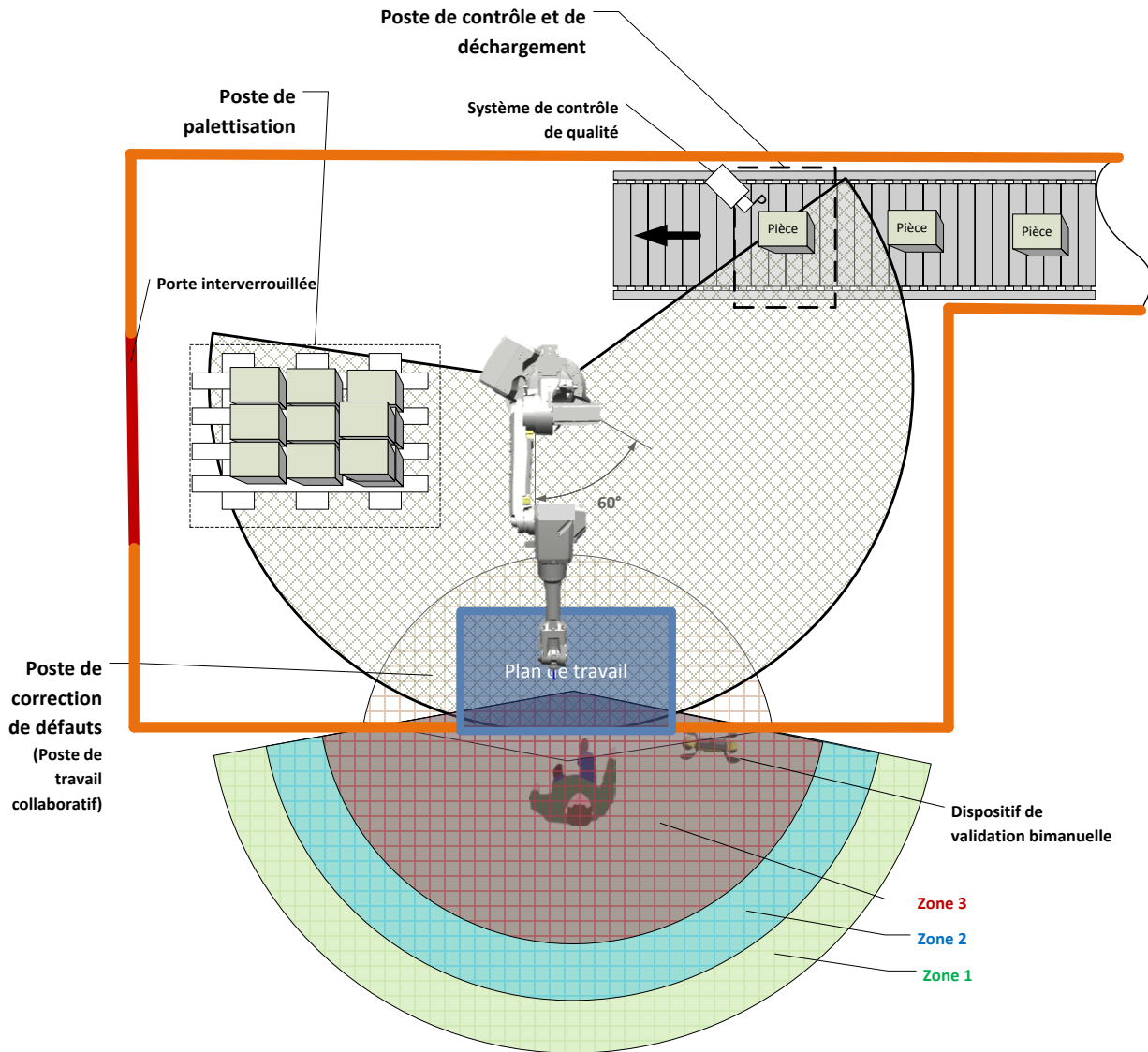


Figure 5 Exemple de cellule robotique collaborative.

Pour la mise en œuvre de la cellule, nous avons supposé que l'intégrateur a respecté les principes généraux de conception décrits par la norme ISO 12100:2010 et notamment, qu'il est passé par les étapes suivantes :

- Établir le cahier des charges;
- Effectuer l'appréciation des risques en prenant en compte les tâches prévues pour la cellule;
- Choisir le mode ou la combinaison de modes de fonctionnement collaboratif requis pour l'application;

- Définir les moyens de protection suggérés par l'appréciation des risques et dictés par les exigences de sécurité de la norme EN ISO 10218-1:2011 relatives aux modes de fonctionnement collaboratif choisis;
- Si les moyens de protection font appel au système de commande :
 - définir les fonctions de sécurité;
 - déterminer le niveau de performance pour chacune des fonctions de sécurité.
- S'assurer de l'adéquation entre les fonctions de sécurité ou fonctions relatives à la sécurité proposées par les cartes électroniques ou modules des fabricants et les réels besoins de l'application. Si des fonctions de sécurité ne sont pas assurées par ces cartes ou modules, les réaliser par des moyens externes (ex., automate dédié à la sécurité).

Supposons que la première étape de conception (cahier des charges) suivie par l'intégrateur conduit au choix de la séquence suivante à automatiser qui comprend huit points :

- En l'absence de défauts, le robot récupère une pièce au poste de déchargement et la pose sur le poste de palettisation suivant un ordre prédéfini (afin de former une palette). Lors de cette opération, le convoyeur s'arrête lorsque la pièce suivante se trouve au poste de contrôle et de déchargement et reste arrêté en attendant la prochaine opération;
- Lorsqu'une pièce défectueuse est détectée au niveau du poste de contrôle et de déchargement, le convoyeur s'arrête et attend que le robot vienne acheminer la pièce vers le poste de correction de défauts;
- En cas de défaut, le robot récupère la pièce défectueuse sur le convoyeur et l'apporte au poste de travail collaboratif pour que l'opérateur puisse réaliser des opérations manuelles. Pendant cette phase, le convoyeur transporte une autre pièce au poste de contrôle et de déchargement, puis attend que l'opération de correction de défauts et celle de palettisation se terminent;
- Pendant l'opération de correction manuelle de défaut (travail collaboratif), le robot est en arrêt de sécurité et maintient la pièce;
- La fin de l'opération de correction de défauts est validée par l'opérateur au moyen d'un organe de commande. Une fois que l'opérateur laisse la zone 3, le robot achemine la pièce corrigée au poste de palettisation puis reprend son cycle normal;
- Quelle que soit l'étape du cycle dans laquelle se trouve le robot, lorsque l'opérateur s'approche de la zone de travail collaboratif, un signal sonore est déclenché lorsque l'opérateur pénètre en zone 1. Ensuite, s'il est en mouvement, le robot passe en mode vitesse réduite lorsque l'opérateur entre en zone 2. Enfin, le robot s'arrête en sécurité lorsque l'opérateur est en zone 3;
- Si l'opérateur est en zone 3 et que le robot n'a pas fini sa trajectoire pour amener la pièce au poste de travail collaboratif, l'opérateur dispose d'un dispositif de validation bimanuel pour permettre au robot de compléter sa trajectoire à vitesse réduite;
- Si l'opérateur juge que le défaut de la pièce ne peut être corrigé, il commande le relâchement de la pièce par un bouton poussoir afin de pouvoir la libérer manuellement du processus de palettisation. Le robot revient automatiquement au poste de contrôle après

que l'opérateur ait validé cette opération et soit sorti de la zone 3. Dans ce cas, le robot ne passe pas par le poste de palettisation.

Découlant de l'analyse de l'étape 3, le tableau 3 et le tableau 4 ont guidé la réalisation des fonctions de sécurité pour l'étude de cas.

3.2 Résultats

Le tableau 3 présente les fonctions relatives à la sécurité (FRS) contribuant à la réalisation d'un ou plusieurs des 4 modes de fonctionnement collaboratif pour les trois robots étudiés. Ces fonctions sont traitées par la carte électronique ou le module dédié à la sécurité de chaque robot. L'assignation de chacune de ces fonctions à un mode de fonctionnement collaboratif découle de l'analyse de l'équipe de recherche.

L'analyse a également permis de regrouper les FRS en trois familles génériques (tableau 4) :

- FRS d'arrêt : fonctions qui entraînent un arrêt du robot avec ou sans coupure d'énergie, en raison d'une commande externe, d'une défaillance ou d'une anomalie (ex., décélération non conforme à la rampe de freinage);
- FRS de surveillance : fonctions qui surveillent certaines caractéristiques du robot pour maintenir son arrêt sous énergie ou pour éviter qu'elles ne dépassent des valeurs prédéfinies (violation de limites). Il peut s'agir de limite de vitesse ou d'espace;
- FRS générales : fonctions qui ne sont ni d'arrêt ni de surveillance (ex., contrôle cyclique des freins).

Pour l'étude de cas, l'appréciation des risques liée à la cellule cobotique a orienté l'équipe de recherche vers une combinaison de deux modes de fonctionnement collaboratif : « Arrêt nominal de sécurité contrôlé » (mode 1) et « Contrôle de la vitesse et de la distance de séparation » (mode 3). Cette décision a mené aux choix des moyens de protection suivants :

- un scrutateur laser pour détecter la présence de l'opérateur à proximité du poste de travail collaboratif;
- une porte coulissante munie d'une serrure à interverrouillage qui sécurise l'entrée dans la zone de déchargement de palette lorsqu'une tâche collaborative est en cours;
- un dispositif de validation bimanuel (commande à action maintenue) pour commander le robot depuis le poste de travail collaboratif.

Tableau 3 Liste des fonctions relatives à la sécurité (FRS) par robot et leur contribution aux modes de fonctionnement collaboratif

FRS, par fabricant, permettant d'atteindre le mode de fonctionnement collaboratif		Mode*			
		n° 1	n° 2	n° 3	n° 4
Robot n° 1	1 Arrêt de protection (arrêt de catégorie 2)	✓	✗	✗	✗
	2 Réinitialisation après arrêt de protection	✓	✗	✗	✗
	3 Contrôle des arrêts de catégories 1 et 2 (arrêt de catégorie 0 généré si violation des critères d'arrêt de cat. 1 ou 2)	✓	✗	✗	✗
	4 Limitation de la position du point central de l'outil	✗	✗	✓	✗
	5 Limitation de la position d'articulation	✗	✗	✓	✗
	6 Limitation de la vitesse d'articulation	✗	✓	✓	✓
	7 Limitation de la vitesse du point central de l'outil	✗	✓	✓	✓
	8 Contrôle de la distance de séparation : fonction configurable, mais non disponible telle quelle sur le robot. Pour la réaliser, il faudra brancher un dispositif de protection à l'interface de sécurité.	✗	✗	✓	✗
	9 Limitation de la force du point central de l'outil	✗	✗	✗	✓
	10 Limitation de l'impulsion	✗	✗	✗	✓
	11 Limitation de la puissance	✗	✗	✗	✓
Robot n° 2	1 Limite de vitesse du point central de l'outil ou de la bride	✓	✗	✓	✓
	2 Limite de position par axes	✗	✗	✓	✗
	3 Limite de vitesse par axes	✗	✓	✓	✓
	4 Limite de position du point central de l'outil ou de la bride	✗	✗	✓	✗
Robot n° 3	1 Rampe de décélération sûre	✓	✗	✗	✗
	2 Arrêt sûr	✓	✗	✗	✗
	3 Surveillance d'arrêt sûr	✓	✗	✗	✗
	4 Vitesse d'axe sûre	✗	✓	✓	✓
	5 Vitesse d'outil sûre	✗	✓	✓	✓
	6 Intervalle d'axe sûr	✗	✗	✓	✗
	7 Zone d'outil sûre	✗	✗	✓	✗
	8 Surveillance de zone d'axe	✗	✗	✓	✗
	9 Surveillance de zone d'outil	✗	✗	✓	✗

✓ : contribue

✗ : ne contribue pas

* Mode 1 : arrêt nominal de sécurité contrôlé

Mode 2 : guidage manuel

Mode 3 : contrôle de la vitesse et de la distance de séparation

Mode 4 : limitation de la puissance et de la force du robot

Tableau 4 Classification des fonctions relatives à la sécurité (FRS) énumérées dans les normes ISO 10218:2011 parties 1 et 2 concernant la collaboration homme-robot et identification de celles assurées par les robots étudiés

Famille générique de FRS	Nom générique des FRS	Robot n°1	Robot n°2	Robot n°3	
FRS d'arrêt	Arrêt d'urgence	✓	✓	✓	
	Arrêt nominal de sécurité contrôlé (mode 1)				
	Arrêt de protection (catégorie 0)	✓	✓	✓	
	Arrêt de protection (catégorie 1)	✗	✓	✓	
	Arrêt de protection (catégorie 2)	✓	✗	✗	
	Contrôle de décélération lors d'arrêt de catégorie 1 ou 2	✓	✓	✓	
	Guidage manuel (mode 2)				
	Arrêt d'urgence depuis l'équipement de guidage manuel	✗	✗	✗	
FRS de surveillance	Arrêt nominal de sécurité contrôlé (mode 1)				
	Surveillance de la vitesse nulle du robot	✓	✓	✓	
	Surveillance de la position fixe du robot	✓	✓	✓	
	Guidage manuel (mode 2)				
	Surveillance de la vitesse du robot < V limite	✓	✓	✓	
	Surveillance de la vitesse et de la distance de séparation (mode 3)				
	Surveillance de la vitesse du robot < V limite	✓	✓	✓	
	Surveillance de la position du robot	✓	✓	✓	
	Limitation de la puissance et de la force du robot (mode 4)				
	Surveillance de la force < F limite	✓	✗	✗	
Surveillance de la puissance < P limite	✓	✗	✗		
FRS générales	Réarmement délibéré en dehors de l'espace de travail collaboratif après un arrêt de protection	✓+	?	?	
	Synchronisation logicielle	✓	✓	✓	
	Contrôle cyclique des freins	?	?	✓	
	Arrêt nominal de sécurité contrôlé (mode 1)				
	Détection de présence d'un opérateur dans l'espace de travail collaboratif	✓+	✓+	✓+	
	Guidage manuel (mode 2)				
	Commande à action maintenue depuis le dispositif de validation de cet équipement (relâcher la commande entraîne un arrêt nominal de sécurité contrôlé)	✗	✗	✗	
	Surveillance de la vitesse et de la distance de séparation (mode 3)				
Détection de la position de l'opérateur dans l'espace de travail collaboratif	✓+	✓+	✓+		

✓ : FRS présente;

✗ : FRS absente;

+ : rajout nécessaire d'un dispositif de sécurité en entrée;

? : information non repérée dans la documentation.

Les moyens de protection décrits ci-dessus font appel au système de commande par l'intermédiaire des fonctions de sécurité suivantes qui peuvent être des combinaisons de FRS :

- F1** - fonction de ralentissement du robot lorsque l'opérateur s'approche de la zone 2;
- F2** - fonction d'arrêt du robot pour le travail collaboratif (arrêt cat. 2) : arrêter le robot lorsque l'opérateur pénètre en zone 3;
- F3** - commande manuelle (à action maintenue) du robot : déplacer le robot à vitesse lente même lorsque l'opérateur est en zone 3;
- F4** - fonction d'arrêt de protection cat. 0 ou 1 initiée par le dispositif d'interverrouillage de la porte coulissante;
- F5** - fonction de réarmement manuel après le déclenchement de l'interverrouillage;
- F6** - fonction de relâchement de la pièce par un bouton poussoir accessible en zone 3.

Le tableau 5 présente les FRS permettant de mettre en œuvre ces fonctions de sécurité. Les FRS sont issues du tableau 3 et du tableau 4. Elles proviennent donc des cartes et des modules des trois robots étudiés.

Tableau 5 Mise en œuvre des fonctions de sécurité nécessaires à la cellule cobotique de l'exemple, suivant les instructions des différents fabricants étudiés

	Robot n° 1 - FRS requises	Robot n° 2 - FRS requises	Robot n° 3 - FRS requises
F1	Limitation de la vitesse des articulations ou limitation de la vitesse du point central	Limite de la vitesse par axe ou limite de la vitesse du point central	Vitesse d'axe sûre ou vitesse d'outil sûre
F2	Fonction d'arrêt de protection + Fonction de contrôle d'arrêt + Fonction de réinitialisation après arrêt de protection	Fonction d'arrêt de sécurité	Rampe de décélération sûre + Fonction d'arrêt de sécurité
F3	Réinitialisation après arrêt de protection + limitation de la vitesse des articulations ou limitation de la vitesse du point central	Limite de la vitesse par axe ou limite de la vitesse du point central	Vitesse d'axe sûre ou vitesse d'outil sûre + fonction d'opération manuelle
F4	Arrêt de protection (cat. 0 ou 1)	Arrêt de protection (cat. 0 ou 1)	Arrêt de protection (cat. 0 ou 1)
F5	Fonction de réinitialisation après arrêt de protection	Fonction de réarmement externe	Fonction de réarmement externe
F6	Fonction d'arrêt de protection + limitation de la position du point central de l'outil	Fonction d'arrêt de sécurité + limite de position du point central et de la bride	Fonction d'arrêt de sécurité + fonction d'opération manuelle

3.3 Discussion

3.3.1 Les spécifications générales

Le tableau 2 permet de faire la distinction entre des robots qui, par leur conception, sont adaptés au fonctionnement collaboratif et des robots conventionnels transformés pour pouvoir être intégrés dans des cellules cobotiques. Par exemple, si l'on considère la « vitesse max. » par robot, on note que, par conception, les articulations du robot dit « collaboratif » d'origine (robot n° 1) ont une vitesse angulaire (>170 °/s) bien inférieure à celle des articulations des deux autres robots (>710 °/s et >330 °/s). La conception du robot n° 1, par exemple, est adaptée à une future intégration dans une cellule cobotique et offre la possibilité de limiter plus facilement les risques. De même, les cartes ou modules électroniques dédiés à la sécurité font partie intégrante des robots dits « collaboratifs » d'origine, limitant ainsi les réglages requis et les possibilités d'erreur lors de l'intégration.

Toutefois, même si les robots dits « collaboratifs » d'origine sont conçus pour la collaboration homme-robot, leurs vitesses atteignables peuvent être dangereuses pour la sécurité des opérateurs. Une appréciation du risque incluant les calculs des temps de réaction et des distances d'arrêt devra suggérer la valeur adéquate pour la vitesse. Cette valeur devra être bridée et protégée pour éviter sa modification illicite ou accidentelle, d'où l'utilité des mots de passe

mentionnés au tableau 2. De plus, pour des raisons de fiabilité et de sûreté de fonctionnement, ces vitesses devront être surveillées par des fonctions de sécurité afin de faire face à toute défaillance. Par exemple, pour le robot n° 3, la vitesse maximum (théorique) configurable dépasse 330 °/s pour les axes de rotation et équivaut à 10 m/s pour les axes linéaires. Ces valeurs extrêmes paraissent incompatibles avec le travail collaboratif. Il faudra donc être vigilant lors de la spécification des vitesses afin de rester dans des plages compatibles avec l'appréciation du risque. Cette vigilance devra être accrue chez les utilisateurs et les intégrateurs qui feront l'acquisition d'une carte ou d'un module dédié à la sécurité pour transformer un robot conventionnel puissant en un robot collaboratif.

Par ailleurs, il faut noter qu'il y a souvent un abus de langage de la part des fabricants lorsqu'ils utilisent le terme « de sécurité » concernant les modules et cartes dédiés à la sécurité. En réalité, le module a l'aptitude d'être de sécurité, mais pour réaliser une fonction de sécurité complète, ces modules ou cartes devront être complétés par l'intégrateur avec l'ajout d'autres dispositifs (ex., dispositifs de détection) selon des critères qui lui permettront d'atteindre le niveau de performance requis pour la fonction de sécurité complète. Il est donc plus juste de parler de module ou carte « dédié à la sécurité ». La notion de fonction de sécurité intégrée ou à paramétrer est expliquée plus en détail par la suite. Ainsi, cette étude permet de constater que les fonctions disponibles sur les cartes électroniques et les modules dédiés à la sécurité ne sont pas nécessairement des fonctions de sécurité comme le disent les fabricants, mais plutôt des fonctions relatives à la sécurité pour la simple raison qu'elles constituent seulement le bloc « traitement » de la chaîne de fonctions de sécurité à implémenter.

Enfin, les fabricants considèrent les robots dits « collaboratifs » d'origine comme des quasi-machines. D'après les manuels d'utilisation consultés, l'intégrateur a la responsabilité de faire l'évaluation appropriée des risques et de respecter la réglementation et les normes en vigueur relatives aux machines. Toutefois, dans le cas des quasi-machines destinées au marché européen, le fabricant devra toujours fournir une déclaration d'incorporation (directive 2006/42/CE dite « directive machine », art. 13) (The European Parliament and the Council of the European Union, 2006). Le tableau 2 montre que les robots n° 1 et n° 3 possèdent une telle déclaration d'incorporation.

3.3.2 La réalisation des modes de fonctionnement collaboratif

Au tableau 4, on remarque que les fonctions relatives à la sécurité constituant la famille « FRS de surveillance » sont les seules à contribuer à tous les modes de fonctionnement collaboratif. Le tableau 4 montre également les fonctions génériques relatives à la sécurité prescrites par la norme ISO 10218:2011 parties 1 et 2, pour atteindre chaque mode de fonctionnement collaboratif. Le tableau 3 liste une ou plusieurs fonctions relatives à la sécurité permettant de satisfaire un mode donné. L'observation du tableau 3 et du tableau 4 permet de constater que l'existence d'une ou plusieurs fonctions relatives à la sécurité permettant de réaliser un mode de fonctionnement collaboratif ne signifie pas que ce mode est complètement configuré à l'origine sur le robot.

Pour réaliser le mode 1 de collaboration selon la norme ISO 10218-1:2011, il faut pouvoir détecter la présence d'un humain dans l'espace de travail collaboratif. Comme indiqué au tableau

4, les trois robots étudiés requièrent l'ajout d'un dispositif de sécurité capable de détecter cette présence. Par exemple, pour le robot n° 1, la détection est signalée par le dispositif de protection à installer à l'entrée de la fonction de sécurité « arrêt de protection ». Dans le cas du robot n° 2, la détection s'effectue par le capteur du protecteur d'enceinte. Pour le robot n° 3, la détection d'une présence dans l'espace de travail collaboratif se fait par un dispositif de détection externe relié à la carte dédiée à la sécurité. Selon la norme, cette détection doit arrêter le robot en effectuant un arrêt de protection (catégorie 1 ou 0) ou un arrêt de catégorie 2. Dans notre cas, comme démontré au tableau 4, le robot n° 1 est capable de réaliser des arrêts de catégorie 2, tandis que les robots n°2 et n°3 peuvent uniquement réaliser un arrêt de catégorie 1. L'intégrateur doit donc faire attention aux limites du robot sur le plan des catégories d'arrêt lors de la mise en œuvre.

Pour le mode 2, on remarque au tableau 3 que les seules fonctions disponibles sur les trois robots sont celles de limitation de vitesse. Pour satisfaire ce mode, il manque : l'équipement de guidage manuel placé près du terminal du robot, ainsi que l'arrêt d'urgence et le dispositif de validation disponibles à même l'équipement de guidage manuel. L'intégrateur, qui veut installer ce mode tout comme n'importe quel mode, devra s'assurer que le robot dispose de toutes les caractéristiques techniques pour pouvoir mettre en œuvre le mode de fonctionnement collaboratif en question.

À propos du mode 3, tous les robots étudiés disposent de fonctions de limitation de vitesse qui permettront de maintenir une vitesse estimée sécuritaire. Ils comprennent également des fonctions de limitation de position qui contribueront à maintenir une certaine distance de séparation entre le robot et l'opérateur. Un dispositif de protection (ex., un capteur de position) permettant de calculer cette distance en temps réel pourra être installé et configuré afin de réaliser ce mode entièrement. Sinon, ce dispositif de protection peut être un détecteur de présence (ex., scrutateur laser) fixé au sol, par exemple; une fois l'espace protégé franchi, cette détection d'intrusion commande au contrôleur du robot de réguler la vitesse. L'utilisation de ce mode reste conditionnée par la disponibilité de dispositifs de détection permettant de détecter l'opérateur en temps réel. Ces dispositifs devront répondre aux exigences de fiabilité de sûreté de fonctionnement (PL d, catégorie 3). De plus, afin de mettre en œuvre ce mode de fonctionnement collaboratif, le robot devra disposer de la capacité de modifier sa trajectoire dynamiquement, ce qui n'est pas le cas de la plupart des robots industriels disponibles sur le marché. Néanmoins, Winkler et Suchý (2011) montrent que l'utilisation détournée d'une interface de capteur permet d'exploiter un champ de force virtuel créé à partir des données issues d'une caméra afin d'éviter un obstacle mobile (l'opérateur, par exemple). Cette méthode s'appuie sur la commande en impédance afin de permettre au robot de changer sa trajectoire en temps réel en fonction d'un objet mobile se trouvant dans son espace de travail. Une alternative pour empêcher que le robot viole la distance de séparation serait de réduire sa vitesse et ensuite passer au mode 1, s'il y a lieu.

Quant au mode 4 décrit dans la norme ISO 10218-1 et détaillé dans le document technique ISO/TS 15066, il impose de limiter la force et la puissance du robot afin de réduire les risques liés à une collision à un seuil acceptable. Pour ce mode, les fonctions de limitation de vitesse contribuent à atteindre le niveau de sécurité requis, car en limitant la vitesse, on restreint l'énergie cinétique, donc la puissance dégagée lors d'une collision homme-robot. Toutefois, il est

nécessaire de disposer d'une fonction de sécurité capable d'arrêter le robot lors d'une collision en cas de dépassement des seuils d'effort tolérables. Comme l'indique le tableau 4, l'absence de capteurs d'effort pour les robots n° 2 et n° 3 rend difficile la mise en œuvre de ce mode. En effet, il est essentiel d'utiliser, pour ce mode, des robots qui sont conçus pour le fonctionnement collaboratif et spécifiquement pour le mode 4. Ces robots, généralement désignés sous le nom « robots à limitation de puissance et de force » (*PFLR : Power and Force Limited Robots*), disposent de caractéristiques intrinsèques qui contribuent à la diminution des risques (ex. : masse réduite, bords arrondis, matériaux viscoélastiques). De plus, ils ont généralement des fonctions de sécurité permettant la mise en œuvre de ce mode, telle que la fonction de surveillance de la force de contact et la fonction de surveillance de la vitesse. Il est tout de même important de rappeler que l'utilisation de ce mode doit répondre à un réel besoin d'interaction homme-robot et doit faire suite à une appréciation des risques rigoureuse. En effet, les fonctions de sécurité nécessaires à la mise en œuvre de ce mode doivent répondre aux exigences de sûreté de fonctionnement dictées par la normalisation à savoir PL d et catégorie 3, ainsi qu'à l'interdiction des contacts avec certaines parties du corps comme la tête.

Dans le cas du robot n° 2, un capteur d'effort pourrait être installé au point central de l'outil (PCO). Toutefois, dans ce cas, l'arrêt du robot à la suite d'un impact avec un humain ne sera pas ordonné si la personne entre en contact avec une partie autre que le PCO. Une alternative pourrait être de placer un capteur d'effort entre la base du robot et le sol. Cette fois, un impact physique pourra être détecté, peu importe le point de contact. Dans le cas du robot n° 1, plus il se déplace rapidement, plus il est difficile de l'arrêter, même s'il possède les fonctions de sécurité autres que « vitesse » permettant de contrôler la puissance et la force. De plus, la limitation de force est possible seulement si le robot n° 1 rencontre un obstacle physique (ex., collision avec un humain) au niveau de son outil ou proche de celui-ci. Les chances d'arrêter ce robot à pleine vitesse ou en appuyant ailleurs sur son bras sont minces si celui-ci rentre en contact avec un opérateur immobile ou se déplaçant lentement. Par contre, c'est l'un des robots les plus légers, avec des formes arrondies (aucune arête vive), donc limitation (mais pas suppression) des dommages par conception intrinsèque.

La famille « FRS générales » du tableau 4 montre que l'intégration d'une cellule robotique collaborative peut être un exercice complexe. Comme on l'a constaté lors de l'analyse des cartes et du module des trois robots étudiés, cette complexité peut s'expliquer en raison d'un manque d'informations nécessaires pour implémenter une fonction de sécurité (cf. les « ? » du tableau 4). Il s'agit d'informations pouvant être absentes de la documentation technique ou non disponibles auprès du fabricant. Notons que même pour le robot n° 3 où toute la documentation et l'assistance du fabricant et de son distributeur étaient accessibles, certains éléments restaient sans réponse. Cette complexité s'explique aussi par l'imbrication d'un mode de fonctionnement collaboratif dans un autre (ex., la norme ISO 10218:2011 exige que le mode 1 soit actionné lorsqu'on relâche la poignée de validation en mode 2). En effet, selon l'application, un mode ne peut à lui seul assurer la sécurité de l'opérateur. Une combinaison de modes peut s'avérer nécessaire comme les modes 1 et 3 combinés dans l'étude de cas.

3.3.3 Catégories d'arrêt et modes de fonctionnement collaboratif

La norme ISO 10218-1:2011 stipule que, pour le mode 1, une violation (mouvement intempestif ou défaillance) de la rampe de décélération lors du freinage doit provoquer un arrêt de catégorie 0 (voir le glossaire pour la définition des catégories d'arrêt et l'annexe C pour visualiser le fonctionnement de ces types d'arrêts). Cette condition est respectée pour les trois robots étudiés (tableau 4). Quant aux modes 2 à 4, toute violation de limite de vitesse ou position doit générer un arrêt de protection selon la norme. La sous-section 5.5.3 de cette norme stipule que cet arrêt doit être minimalement de cat. 0 ou 1; un arrêt de protection supplémentaire de cat. 2 peut exister. Pour les modes 2 à 4, une violation de limite engendrera un arrêt de protection de cat. 0 pour les robots n° 1 et n° 2. Quant aux modes 2 à 4 pour le robot n° 3, l'arrêt de protection sera de cat. 0 ou 1 selon la configuration choisie lors de l'installation. La logique d'arrêt des trois robots étudiés semble donc conforme à la norme.

3.3.4 Paramétrage et niveau de performance global

En comparant le tableau 3 et le tableau 4, on constate que les fonctions relatives à la sécurité du tableau 3 consistent essentiellement en des fonctions d'arrêt et des fonctions de surveillance de vitesse, de position, de force et de puissance. C'est un constat important qui doit être considéré lors de l'intégration du robot à la production : le temps de réaction de la fonction de sécurité dépendra de la somme des temps de réaction de chacune des fonctions relatives à la sécurité (incluant celles rattachées à des dispositifs de protection), auxquels il faut ajouter le temps d'arrêt du robot. Ainsi, la détermination des distances de sécurité devra tenir compte de ce critère.

Certaines fonctions de sécurité transitant par la carte électronique ou le module dédié à la sécurité sont complètement implémentées à la conception du robot et respectent le niveau de performance minimum requis : $PL_r d$, catégorie 3 selon la norme ISO 10218-1:2011. C'est le cas des fonctions d'arrêt d'urgence évaluées dans notre étude. Sinon, d'autres fonctions de sécurité requièrent du paramétrage (ex., spécifier les limites de vitesses ou de position) ou des ajouts matériels en entrée ou en sortie (ex., rajout d'un rideau optique pour détecter une présence dans l'espace de travail collaboratif ou rajout d'un capteur d'effort). La partie « traitement » de ces fonctions de sécurité est déjà disponible sur les cartes ou modules dédiés à la sécurité et respecte le niveau de performance requis.

C'est à l'intégrateur de s'assurer de préserver le niveau de performance de la fonction de sécurité transitant sur la carte ou le module, en choisissant un composant d'entrée ou de sortie de fiabilité appropriée conformément au tableau 11 de la norme ISO 13849-1:2015. Ce tableau montre que le nombre de composants à rajouter est critique. Par exemple, une chaîne fonctionnelle formée de composants de PL e aura un PL d, donc inférieur, si la chaîne a plus de 3 composants. Ainsi, les niveaux de performance annoncés pour les fonctions de sécurité des cobots sont souvent des niveaux atteignables, mais non atteints dans les faits. Pour réaliser la chaîne complète d'une fonction de sécurité, l'intégrateur aura souvent besoin de combiner plusieurs fonctions relatives à la sécurité disponibles sur les cartes électroniques ou modules des fabricants. L'étude de cas présentée illustre bien ce fait : le tableau 5 montre que pour sécuriser l'installation cobotique, que ce soit avec le robot n° 1, n° 2 ou n° 3, une combinaison de FRS peut être requise pour réaliser

une fonction de sécurité. L'intégrateur peut également utiliser des composants ou dispositifs externes (cf. figure 6). En effet, les fonctions de surveillance de zone dans l'étude de cas (cf. F1 et F2 au tableau 5), en plus de solliciter des combinaisons de FRS issues des cartes électroniques ou modules dédiés à la sécurité, nécessitent des éléments externes comme le scrutateur laser. Ce dernier, en plus de devoir répondre aux exigences de niveau de performance est souvent accompagné d'un module de contrôle (de type automate) qui nécessite d'être programmé ou configuré, puis relié à la carte ou module dédié à la sécurité. La fonction de sécurité doit donc être considérée dans sa globalité. L'intégrateur devra choisir de manière judicieuse les dispositifs externes (ex., dispositif de protection) compatibles avec la fonction de sécurité générale qu'il souhaite mettre en œuvre. En effet, si on considère que la fonction F1 de ralentissement du robot lorsque l'opérateur est en zone 2 est une fonction de sécurité, le dispositif de détection utilisé devra avoir deux zones de détection (zone 2 et zone 3 dans l'exemple) et devra être compatible avec le niveau de performance requis pour la robotique collaborative, c.-à-d. $PL_r d$. Si le scrutateur ne permet pas de respecter cette condition, l'ajout d'un autre dispositif de protection adapté à l'application devra être envisagé.

Le tableau 5 indique aussi que, même si les fonctions relatives à la sécurité entre les fabricants possèdent des similitudes, plusieurs différences techniques demeurent présentes. Par exemple, pour réaliser la fonction F5, le robot n° 1 sera réinitialisé automatiquement après un arrêt de protection, tandis que le robot n° 3 le sera par un réarmement externe.

L'intégrateur devra donc être vigilant et sélectionner la combinaison nécessaire de FRS du fabricant tout en faisant attention aux incompatibilités entre ces fonctions. Des FRS sont incompatibles dans le cadre de la réalisation d'une fonction de sécurité si, ensemble, elles réduisent le niveau de performance requis pour la fonction de sécurité. L'intégrateur doit se rappeler qu'une fonction de sécurité doit être complète et donc englober tous les éléments participant à la sécurité.

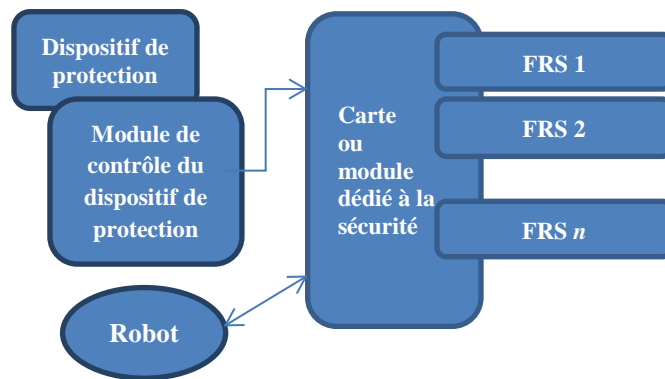


Figure 6 Implémentation d'une fonction de sécurité en général.

3.3.5 Portée et applicabilité des résultats

Dans l'exemple illustré, l'équipe de recherche s'est mise dans la peau d'un intégrateur qui doit concevoir des fonctions de sécurité à partir des fonctions relatives à la sécurité, disponibles sur les cartes électroniques ou modules dédiés à la sécurité, dans le cadre d'une collaboration

homme-robot. L'étude de cas illustre la démarche d'intégration d'une cellule robotique collaborative, sans toutefois la détailler. En effet, l'exemple traité ne considère pas tous les risques menaçant la sécurité des personnes avoisinantes, tels que ceux provoqués par l'intrusion d'une personne dans la cellule. Conséquemment, tous les moyens de réduction du risque associés ne sont pas couverts. Toutefois, les résultats et constats associés à cette étude théorique serviront de mises en garde aux intégrateurs voulant développer une application collaborative à partir d'un robot dit « collaboratif » d'origine ou transformé pour le devenir.

En regard du premier objectif de recherche annoncé au chapitre 2, il est possible de conclure que la plupart des fonctions présentes sur les cartes ou modules dédiés à la sécurité qui ont fait l'objet de l'étude sont des fonctions relatives à la sécurité (FRS) plutôt que des fonctions de sécurité (FS). Le terme « fonction de sécurité » attribué à ces fonctions par les fabricants concernés est inapproprié et devrait plutôt être remplacé par « fonction relative à la sécurité » (FRS).

L'étude de cas présentée a illustré la manière dont ces FRS assurent la protection des opérateurs en fonction de divers modes de fonctionnement collaboratif. Cette protection est assurée par des combinaisons de FRS disponibles sur la carte, sur le module ou en provenance de composants rajoutés. Selon les prescriptions normatives et les résultats d'une appréciation du risque, il a été montré qu'une combinaison de modes de fonctionnement collaboratif peut également être nécessaire pour assurer la protection de l'opérateur.

Ce volet de l'étude visait à comparer les robots d'un point de vue théorique, essentiellement à partir des spécifications techniques et d'autres informations disponibles dans les manuels de l'utilisateur associés. À l'avenir, il sera pertinent de comparer concrètement les performances techniques de différents robots, afin d'illustrer de manière pratique comment la réalisation d'un mode varie d'un robot à l'autre. Par le fait même, il sera possible de connaître les limites techniques de certains robots à réaliser un mode de fonctionnement collaboratif. Une telle comparaison pratique pourra servir de repère aux intégrateurs, ainsi qu'aux donneurs d'ouvrage. Ils pourront savoir quels types de robots sont compatibles avec quels modes de fonctionnement collaboratif. Ils pourront connaître les limites ou les astuces pour réaliser un mode donné selon le robot testé.

4. VOLET « TERRAIN » : RETOUR D'EXPÉRIENCE

Le second volet de l'étude consiste à faire un retour d'expérience sur la prise en compte de la sécurité pour quatre projets d'implantation d'un robot collaboratif en entreprise. Ce nombre limité s'explique par le fait que seulement quatre des 14 entreprises au Québec contactées initialement détenaient un robot, installé ou en cours d'intégration, pour une application collaborative. Deux autres entreprises contactées possédaient un robot dit « collaboratif » d'origine, mais réfléchissaient à l'application à lui attribuer. Autrement, les huit entreprises restantes ne possédaient pas de tels robots.

Le volet « terrain » cible trois types de participants :

- l'utilisateur (c.-à-d. le donneur d'ouvrage) : personne ou entité ayant besoin du robot collaboratif pour sa production et qui établit normalement le cahier des charges destiné à l'intégrateur pour l'installation;
- l'intégrateur : personne qui conçoit le poste de travail, installe et effectue les réglages initiaux du robot chez le donneur d'ouvrage, selon le cahier des charges établi. Il est un employé de l'entreprise ou un sous-traitant;
- le travailleur : personne côtoyant ou interagissant avec le robot collaboratif lors de ses activités habituelles dans l'entreprise.

Comme cela est illustré à la figure 7, ce volet de l'étude permet de documenter les difficultés vécues et les défis relevés par les donneurs d'ouvrage et par les intégrateurs. Elle permet également de documenter les risques SST et les avantages apportés par cette technologie aux travailleurs.

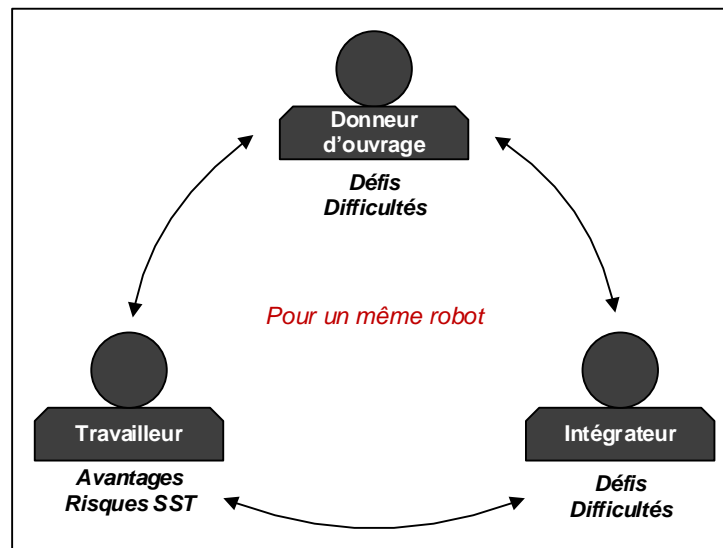


Figure 7 Les participants au volet « terrain ».

À la suite de la présentation de la méthode utilisée, cette section expose et commente les éléments suivants : 1) les principales caractéristiques des quatre études de cas observées, 2) la situation avant l'intégration, 3) le processus d'intégration, les difficultés et les solutions choisies,

4) les suivis à la suite de l'intégration. Les résultats et les discussions sont présentés conjointement pour chacun des éléments. Les résultats sont rapportés sous la forme de faits observés sur le terrain. Ils se trouvent généralement dans des tableaux. Les discussions consistent soit en des passages commentant les résultats, soit en des recommandations.

4.1 Méthode

La méthode appliquée pour l'étude-terrain est la suivante :

- Obtenir le certificat d'éthique de la recherche afin d'être autorisé à recueillir de l'information sur le terrain;
 - Élaborer une grille de collecte de données destinée à chacun des trois types de participants (cf. annexes D, E et F);
 - Recruter des entreprises ayant une installation cobotique;
 - Visiter 4 entreprises ayant au moins une installation cobotique. Ces entreprises sont nommées A, B, C, D, respectivement;
 - Mener une entrevue semi-dirigée avec chacun des participants, à l'aide de la grille de collecte de données correspondante. Les trois entrevues ont eu lieu dans la même journée ou à des moments distincts selon les disponibilités des participants;
- N.B. Pour des raisons hors de notre contrôle, il a été impossible de rencontrer le travailleur de l'une des 4 entreprises;
- Observer l'installation cobotique. Quand elle était en cours de réalisation, observer la tâche à automatiser, l'emplacement définitif futur de l'installation et les bancs d'essai (robots et moyens de protection) relatifs à l'installation.

4.2 Caractéristiques des 4 études de cas

Cette sous-section donne une vue d'ensemble des études de cas menées sur le terrain et permet de les comparer. À l'entreprise A, trois études de cas étaient disponibles : A₁, A₂ et A₃. En raison du temps alloué pour la visite de cette entreprise, la collecte de données a été concentrée sur la plus ancienne des trois installations : A₁, en place depuis 1 an ½, dont l'équipement périphérique du robot était une presse plieuse. Dans les trois autres entreprises, une étude de cas a été conduite dans chacune : B, C, puis D.

Les figures 8 à 11 illustrent les applications cobotiques étudiées : A₁, B, C et D. Elles ne sont pas nécessairement à l'échelle. La géométrie du robot illustré a été volontairement modifiée par rapport à la réalité afin de minimiser la possibilité de reconnaître l'entreprise. Les buts principaux de ces figures sont de représenter le partage de l'espace entre le travailleur et le robot et de permettre de mieux visualiser les principales étapes de la tâche automatisée. En effet, les numéros ou les explications dans chaque figure indiquent l'ordre dans lequel se déroule cette tâche ou aident à la comprendre. La figure 8 et la figure 9 illustrent respectivement les cas A1 et B où l'intégration était achevée. La figure 10 et la figure 11 détaillent les cas C et D, respectivement, où le processus d'intégration était en cours. À la figure 10, l'installation C'était

en cours d'évolution, tandis qu'à la figure 11, l'installation D était à l'étape de banc d'essai et de plans.

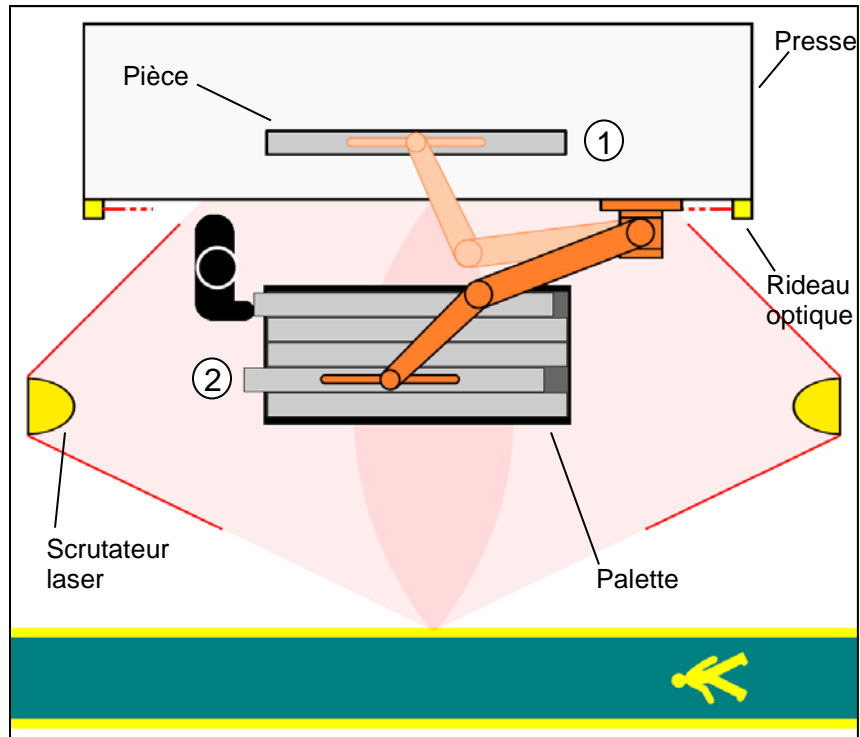


Figure 8 Vue de dessus de l'application cobotique A₁.

Dans le cas A₁, le robot ralentit quand quelqu'un pénètre dans l'espace de travail collaboratif. La vitesse réduite du robot est déclenchée quand le scrutateur laser détecte une présence. Quant au rideau optique, il gère uniquement la sécurité en ce qui a trait à la matrice de la presse. S'il détecte une présence, la presse s'arrête.

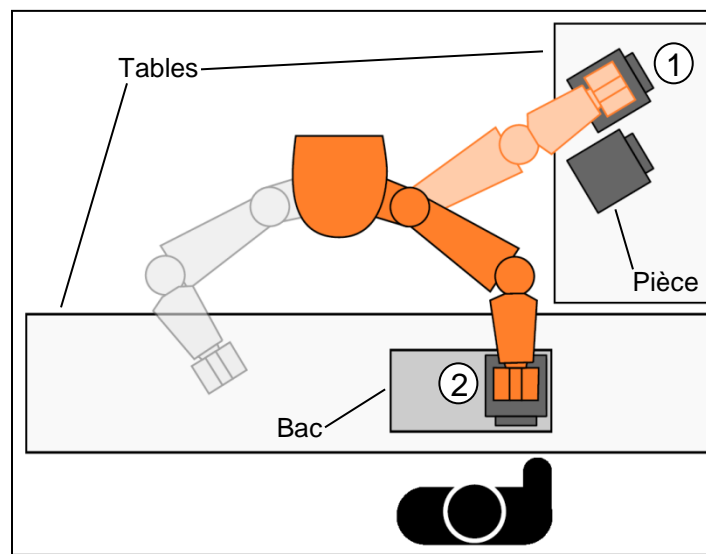


Figure 9 Vue de dessus de l'application cobotique B.

Dans le cas B, le robot fonctionne à vitesse de production. Cependant, il ralentit de rythme quand son système de vision, intégré par conception, détecte une présence.

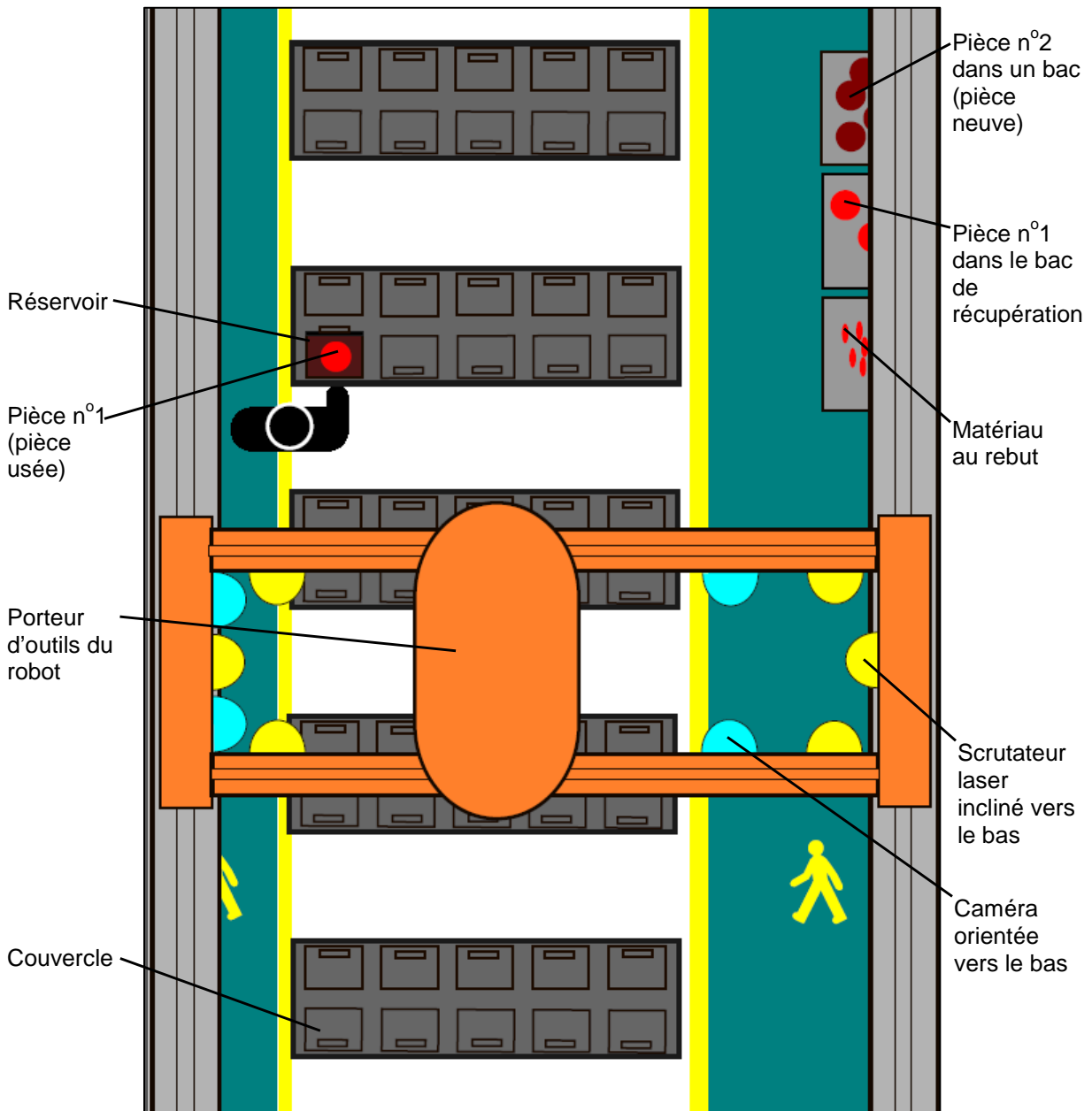


Figure 10 Vue de dessus de l'application cobotique C.

Note : Ce schéma représente l'application observée dans l'entreprise C lors de notre visite. Les moyens de protection étant en cours de test, des modifications ont pu y être apportées par la suite.

Dans le cas C, la vitesse réduite du robot et un avertissement sonore sont déclenchés quand au moins un scrutateur laser ou une caméra détecte une présence. Ensuite, l'arrêt du robot est activé si la zone de sécurité est franchie (le rayon de sécurité sera déterminé ultérieurement, par l'intégrateur).

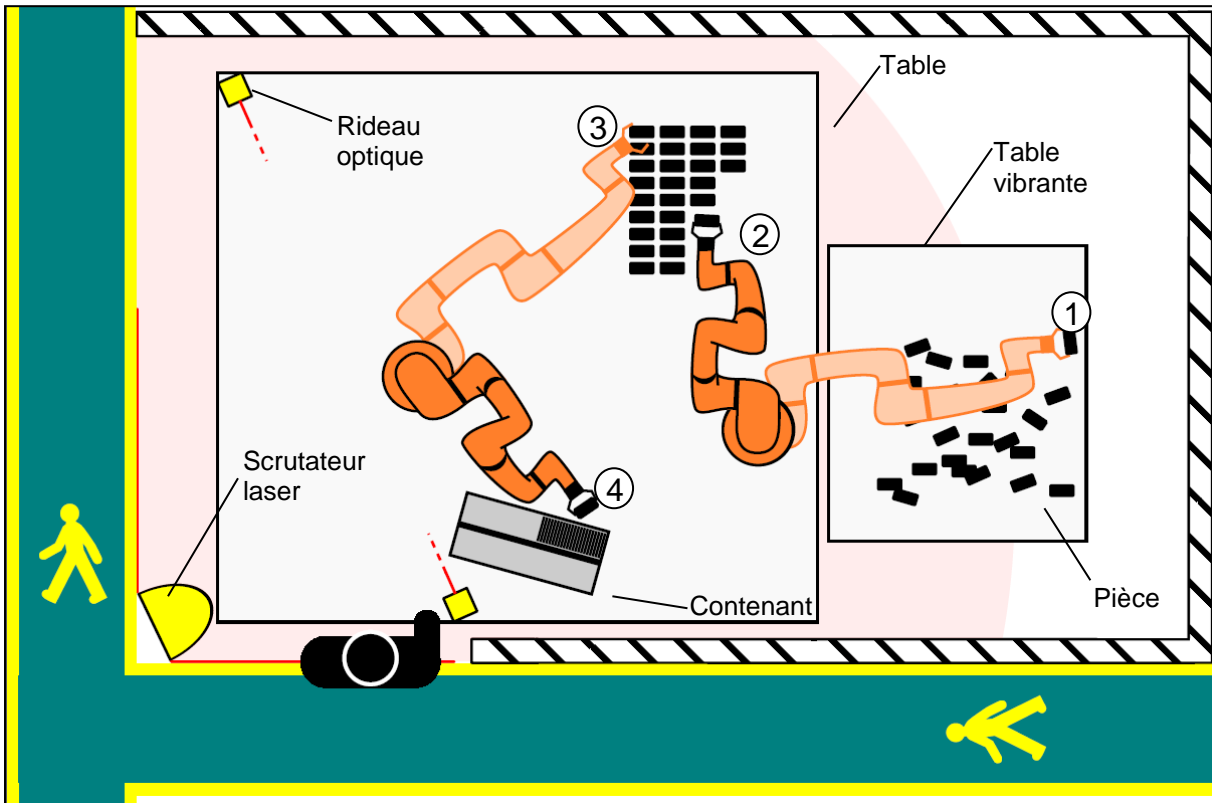


Figure 11 Vue de dessus de l'application cobotique D.

Dans le cas D, la vitesse réduite est déclenchée quand le scrutateur laser détecte une présence. Ensuite, l'arrêt des robots est activé si le rideau optique détecte une présence.

Le tableau 6 fournit un aperçu du contexte des quatre études de cas.

Tableau 6 Survol des études de cas

	Application cobotique			
	A ₁ , A ₂ , A ₃	B	C	D
Secteur d'activité de l'entreprise visitée	Métal	Services en automatisation	Métal	Aérospatial
État d'avancement de l'étude de cas	Cellules cobotiques achevées depuis 1an½ ou moins et utilisées pour la production.	Application démonstrative en atelier (preuve de concept pour un client).	Cellule cobotique en cours d'évolution. Tests de fonctionnement des moyens de protection en cours.	Cellule cobotique en cours d'intégration. Bancs d'essai en place.
Type de participants interrogés	<ul style="list-style-type: none"> • Donneur d'ouvrage • Intégrateur • Travailleur 	<ul style="list-style-type: none"> • Donneur d'ouvrage • Intégrateur • Travailleur (simulation de sa tâche) 	<ul style="list-style-type: none"> • Donneur d'ouvrage • Intégrateur 	<ul style="list-style-type: none"> • Donneur d'ouvrage • Intégrateur • Travailleur
Nombre de robots par cellule cobotique	1	1	1	2
Espace de travail collaboratif	<ul style="list-style-type: none"> • Fixe • Avec zone fixe de détection de présence 	<ul style="list-style-type: none"> • Fixe • Avec zone fixe de détection de présence 	<ul style="list-style-type: none"> • Mobile • Avec zone mobile de détection de présence 	<ul style="list-style-type: none"> • Fixe • Avec zone fixe de détection de présence
Modes de fonctionnement collaboratif utilisés^A	3 et 4	4	1 et 3	1, 3 et 4

^A La norme ISO 10218:2011 désigne 4 modes de fonctionnement collaboratif définis à la sous-section 1.1.1.4 de ce rapport.

Le tableau 6 montre que la cobotique en est à ses débuts au Québec, car seule l'entreprise A avait ses cellules cobotiques en production en 2015, avec les moyens de protection définitifs. Rappelons que c'est le seul cas retrouvé parmi les 14 entreprises contactées. De plus, lors du recrutement des entreprises, il a été constaté que deux d'entre elles ont commandé ou acheté un robot dit « collaboratif » d'origine. Toutefois, elles en sont à l'étape d'analyse du besoin ou en réflexion à l'égard du processus d'intégration qu'elles trouvent particulièrement complexe. Cette complexité s'explique, d'une part, par la difficulté de l'analyse des risques qui est différente de celle de machines courantes pour lesquelles le travailleur est à l'abri des éléments mobiles dangereux au cours de la production. Cette difficulté surgit en raison de la particularité des cobots par rapport à ces machines en matière de sécurisation : l'absence complète ou partielle de protecteurs, avec possibilité de blessure pour le travailleur en cas de collision. D'autre part, selon

l'entreprise, la possibilité de lésion en cas de collision génère une résistance au changement manifestée par des employés ou des membres de la direction, ce qui accentue la complexité. Le tableau 7 décrit les robots utilisés dans les études de cas.

Tableau 7 Description des robots

	Application cobotique et robot associé			
	A ₁ , A ₂ , A ₃	B	C	D
Type de robots	Dit « collaboratif » d'origine	Dit « collaboratif » d'origine	Conventionnel transformé en collaboratif	Dit « collaboratif » d'origine
Nombre de bras	1	2	1	1
Nombre d'axes par bras	6	7	>3 (l'outil installé au bras ajoute des degrés de libertés)	6
Charge utile	10 kg	2,3 kg	35000 kg	3 kg
Portée	R = 1,3 m	R = 1,21 m	L × l ≈ 100 m × 28 m	R = 0,5 m
Vitesse max. (axe)	180 °/s	Inconnue	Inconnue	360 °/s
Vitesse max. (outil)	1 000 mm/s	1 000 mm/s	1 333 mm/s	1 000 mm/s
Contrôleur	Dédié au robot	Dédié au robot	Utilisation d'un contrôleur compatible	Dédié au robot
Carte ou module dédié à la sécurité	Carte d'origine	Carte d'origine	Module externe	Carte d'origine
Performance de sécurité des FRS des cartes ou des modules	Catégorie 3, PL d (valeurs par défaut du fabricant)	Aucune	À déterminer par l'intégrateur	Catégorie 3, PL d (valeurs par défaut du fabricant)
Accès et modifications des paramètres de sécurité	Mot de passe obligatoire pour autoriser les modifications liées à la configuration de sécurité (ex., détermination des limites de position, de vitesse, d'effort). Cependant, aucune procédure écrite n'a été recensée à cet égard.			

Le tableau 6 et le tableau 7 montrent que la robotique collaborative et ses applications ne sont pas uniformes. Par exemple, deux cas principaux de robots et d'applications ont été observés :

- Entreprises A, B et D : des applications dans un espace collaboratif fixe et restreint, avec des robots dits « collaboratifs » d'origine et de charge utile faible. Les zones de détection de présence sont fixes;
- Entreprise C : une application dans un espace collaboratif mobile et vaste avec un robot conventionnel transformé en collaboratif et avec une charge utile très importante. Les zones de détection de présence sont mobiles puisque les détecteurs sont fixés sur le système robotisé qui se déplace.

Le tableau 8 synthétise les tâches des robots dans le cadre de leur collaboration avec le travailleur. La tâche qu'effectue chaque robot y est désignée par « tâche principale », car elle représente le cœur du travail initialement assumée par le travailleur.

Tableau 8 Collaboration homme-robot : tâches exécutées ou prévues par le robot

Application cobotique et tâche principale assumée par le robot en production			
A₁, A₂, A₃	B	C	D
<ol style="list-style-type: none"> 1. Prendre la pièce travaillée par l'équipement périphérique. 2. L'empiler sur une palette. 3. S'arrêter si la pièce tombe, si la palette est pleine ou si une collision est détectée. <p>Durée du cycle de production : ≈ 2 h (8 à 12 s pour produire chaque pièce)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Récupérer la pièce moulée. 2. L'empiler dans un bac jusqu'à capacité maximale. 3. S'arrêter si la pièce tombe, si le bac est rempli ou si une collision est détectée. <p>Durée du cycle de production : ≈ 2 min</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Saisir la pièce n°1 dans le réservoir. 2. La placer dans le bac de récupération. 3. Se déplacer vers le réservoir. 4. Saisir le matériau dans le réservoir et le mettre au rebut (bis). 5. Se déplacer pour récupérer la pièce n°2. 6. La saisir. 7. La poser dans le réservoir. 8. Répéter le cycle pour le prochain réservoir. <p>Durée du cycle de production : ≈ 45 min</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Attraper les pièces qui sont en vrac sur une table vibrante, grâce à un système de caméra (tâche du premier robot). 2. Placer les pièces selon une orientation prédéterminée, selon les informations fournies par la caméra (tâche du premier robot). 3. Récupérer les pièces bien orientées pour les empiler dans un contenant (tâche du second robot). 4. S'arrêter quand le contenant est plein (cas des deux robots). <p>Durée du cycle de production : ≈ 15 min (≈ 5 s par pièce)</p>

Le tableau 9 synthétise les tâches des travailleurs dans le cadre de sa collaboration avec le robot. La tâche qu'effectue le travailleur est désignée « tâche auxiliaire » dans ce tableau, car elle vient en soutien à celle du robot.

Tableau 9 Collaboration homme-robot : tâches exécutées ou prévues par le travailleur

Application cobotique et tâche auxiliaire assumée par le travailleur en production			
A ₁ , A ₂ , A ₃	B	C	D
<ul style="list-style-type: none"> • Superviser régulièrement le bon fonctionnement du robot. • Réaligner, sur la palette, les pièces mal empilées par le robot. • Récupérer les pièces échappées par le robot et les empiler manuellement sur la palette. • Réinitialiser le robot après un arrêt. • Changer les réglages du robot lors de la production d'une nouvelle pièce. • Enlever la palette à l'aide d'un chariot élévateur et la remplacer par une palette vide. 	<ul style="list-style-type: none"> • Superviser le bon fonctionnement du robot. • Enlever le bac rempli et le remplacer par un bac vide. • Réinitialiser le robot après un arrêt en cas de collision ou d'absence de pièce. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ouvrir le couvercle du réservoir pour le robot. • Nettoyer l'aire de travail après l'action du robot. • Fermer le couvercle du réservoir après l'action du robot. • Inspecter le processus de production. 	<ul style="list-style-type: none"> • Déposer un lot de pièces en vrac sur la table vibrante. • Récupérer les contenants, une fois remplis. • Vérifier le nombre de pièces dans les contenants. • Vérifier la qualité des pièces. • Superviser régulièrement le bon fonctionnement des robots.

Le tableau 8 et le tableau 9, ainsi que les figures 8 à 11 montrent que la collaboration travailleur-robot s'exprime par une complémentarité des tâches et, surtout, par un partage de l'espace de travail collaboratif. En somme, il y a essentiellement une cohabitation homme-robot plutôt qu'une véritable collaboration où le travailleur et le robot travaillent simultanément sur la même pièce en production.

4.3 L'avant-intégration observée

Cette sous-section consacrée à l'avant-intégration du robot, dans un contexte collaboratif, présente les besoins qui poussent les entreprises à robotiser une tâche, ainsi que le contenu et l'élaboration du cahier des charges.

4.3.1 Le besoin de robotiser

Le tableau 10 liste les divers facteurs observés expliquant le besoin de robotiser, notamment de « cobotiser », parmi les entreprises visitées : facteurs spatiaux (1 entreprise sur 4), de visibilité (2 entreprises sur 4), économiques et humains (3 entreprises sur 4). Ces familles de facteurs ont été composées à partir de celles préétablies à la section 5 de la grille de collecte de données de l'annexe D. La famille « Facteurs environnementaux » est devenue « Facteurs spatiaux », car

c'était l'unique type de facteur environnemental observé. Enfin, en ce qui a trait aux « Autres bénéfiques escomptés », la visibilité de l'entreprise était l'unique besoin et facteur manifesté.

Tableau 10 Facteurs observés expliquant le recours à la robotique, notamment à la cobotique

	Besoin rattaché	Motif du besoin selon certaines entreprises visitées
Économique	Amélioration de la productivité pour rester concurrentiel	<ul style="list-style-type: none"> • La manipulation d'un produit par un robot est plus fiable. • La robotique est un gage d'amélioration de la qualité, avec une traçabilité automatique de la production.
	Réduction des coûts de main-d'œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Le prix horaire du cobot serait de l'ordre de 5 \$/h, soit moins que le salaire horaire d'un travailleur. • Le cobot permet de réduire, dans certains cas, l'effectif de la main-d'œuvre de 80 %.
	Flexibilité de la gestion de production	<ul style="list-style-type: none"> • La facilité de programmation par apprentissage des robots dits « collaboratifs » d'origine les rend flexibles aux changements de pièces à produire ou à manipuler. Cet atout réduit les coûts globaux d'installation et de mise en route. • L'aptitude des robots dits « collaboratifs » d'origine à pouvoir être déplacés facilement offre de la flexibilité pour changer de production. • Le court temps de réglage des robots dits « collaboratifs » d'origine.
	Retour sur investissement rapide	<ul style="list-style-type: none"> • Le retour sur investissement de l'ordre de 6 à 8 mois compte tenu du faible coût du cobot (< 50 000 \$). • Comme les cobots intègrent plus d'éléments de prévention intrinsèque que les robots classiques, ils peuvent, si l'application le permet, nécessiter moins de moyens de protection conventionnels (c.-à-d., enceinte de protection, protecteurs interverrouillés). À titre d'exemple, une des entreprises n'avait ajouté aucune protection à son application cobotique (cas B) tandis qu'une avait seulement ajouté un scrutateur laser (cas A₁).
Humain	Amélioration des conditions de travail et de la sécurité du travailleur	<ul style="list-style-type: none"> • La robotisation a permis, selon les cas, de réduire l'exposition à des TMS (cas A₁ et D), de réduire les risques mécaniques présents sur une presse (cas A₁) ou de réduire les risques liés au procédé (ex., thermique) (cas C). <p>N.B. La réduction des risques observée concernait l'annulation ou la diminution du temps d'exposition du travailleur aux risques associés à leur ancienne tâche. Cependant, la collaboration homme-robot comme telle crée de nouveaux risques (ex., collision).</p>
	Suppression de postes à faible valeur ajoutée et création de postes de supervision ou de programmation des robots	<ul style="list-style-type: none"> • Certains travailleurs ont vu leurs conditions de travail s'améliorer en accédant à des postes à plus haute valeur ajoutée de supervision du fonctionnement du cobot et des machines avoisinantes. Par exemple, au cas A₁, la tâche à faible valeur ajoutée consistait au pliage et à l'empilage de plus de 500 pièces par quart de travail.
Spatial	Optimisation de l'espace	<ul style="list-style-type: none"> • L'espace de travail exigu : l'entreprise A a opté pour la cobotique en raison de l'espace exigu dont elle disposait. Avec la robotique conventionnelle, il aurait fallu installer une enceinte de protection qui empiéterait sur la voie de circulation, ce qui la rendrait impraticable.

	Besoin rattaché	Motif du besoin selon certaines entreprises visitées
Visibilité	Mise en valeur de l'entreprise	<ul style="list-style-type: none"> • Avoir une application cobotique montre la capacité de l'entreprise à innover et à se démarquer. Pour l'entreprise D, l'application cobotique, représente une vitrine par rapport aux clients, concurrents et autres succursales. C'est aussi un moyen de développer de l'expertise dans le domaine de la robotique collaborative. Une solution robotique sans collaboration aurait été envisageable et même possiblement plus rentable, mais la volonté de la direction était de tester le potentiel de la robotique collaborative.

Ainsi, les principaux motifs qui expliquent le choix d'une application cobotique pour les cas observés sont : le faible coût du cobot comparé à celui d'un robot conventionnel, le retour rapide sur investissement, la suppression de tâches à faible valeur ajoutée, la réassignation de tâches plus valorisantes aux travailleurs, la contrainte spatiale, la visibilité de l'entreprise puisqu'il s'agit d'une nouvelle technologie et la flexibilité de production permise par le cobot. En revanche, il faut s'assurer que les changements de production prévisibles soient considérés dans l'appréciation du risque. Ainsi, les moyens de réduction du risque à mettre en place protégeront le travailleur contre la tâche la plus risquée parmi les changements de production possibles.

Ces motifs, variables d'une entreprise à l'autre, montrent que le choix de la cobotique dans les entreprises visitées s'explique aussi par des besoins autres qu'une réelle nécessité d'interaction homme-robot. Selon nos observations, les facteurs économiques et de SST prennent une place prépondérante dans le choix de telles applications.

4.3.2 Le cahier des charges

4.3.2.1 Contenu du cahier des charges

Trois des quatre entreprises n'ont pas spécifié leur besoin dans un cahier des charges formel. Les donneurs d'ouvrage ont défini verbalement ou dans des messages écrits sommaires (ex., courriel) les spécifications minimales à respecter pour l'installation souhaitée. Les points suivants ont été considérés partiellement dans les réflexions précédant l'intégration de la cellule cobotique à la production. Le ratio des entreprises ayant considéré ce point figure entre parenthèses :

- But du projet (4/4);
- Description de l'application ou du procédé à réaliser (4/4);
- Critères de choix du robot (2/4) – Le coût de l'installation, la précision et le temps de cycle du robot ont guidé le choix. En revanche, l'anthropométrie et la nouvelle charge de travail de l'opérateur n'ont pas été considérées. Aux entreprises B et C, le robot était déjà sur place, bien avant l'idée de projet d'intégration; alors, le choix du robot ne s'appliquait pas à leurs cas;
- Volume de production, temps de cycle, caractéristiques (poids, dimension, matière, aspect, etc.) (4/4) – Le temps de cycle est une variable importante du projet. Par exemple : pour synchroniser d'autres machines impliquées dans le processus de production; pour déterminer la vitesse minimale du robot;

- Nombre de pièces à traiter (4/4);
- Opérations périphériques en amont et en aval, machines utilisées dans le procédé (4/4);
- Environnement dans lequel le robot doit évoluer (4/4) – Par exemple : température, humidité, espace disponible, interférences électromagnétiques
- Spécifications liées à la sécurité (3/4) – Aux entreprises A et C, le comité de SST a discuté des spécifications relatives à la sécurité. Quant à l'entreprise D, elle fera appel à un consultant en SST pour valider son appréciation du risque et ses spécifications actuelles relatives aux normes en vigueur. À l'entreprise B, les spécifications liées à la sécurité concernaient la trajectoire du bras du robot. Cette trajectoire devait causer le moins de risque possible pour le travailleur. En ce sens, des mouvements du bras vers l'intérieur et près du corps du robot étaient privilégiés. Somme toute, le donneur d'ouvrage jugeait le système de détection de présence de son cobot suffisant pour protéger le travailleur. De plus, il trouvait plutôt sécuritaires les pièces de plastique légères manipulées par le robot.
Il était intéressant de constater qu'aux entreprises A, C et D, la sécurité allait au-delà de la protection du travailleur contre une collision avec le robot. Des mesures ont été prises également (cas A₁ et C) ou étaient prévues (cas D) afin de protéger le travailleur contre les machines avoisinant le robot ou les contraintes environnementales agressives :
 - L'entreprise A a considéré les risques de la presse et des pièces manipulées. Elle les a réduits en ajoutant des protecteurs fixes et un barrage immatériel. Elle a informé le travailleur du risque de coupure lié aux bavures tranchantes des pièces;
 - À l'entreprise C, le rayon à sécuriser sera déterminé par une analyse de risque en considérant la vitesse de déplacement du robot et la portée de la pièce pouvant être échappée;
 - L'entreprise D compte apprécier le risque associé à la table vibrante afin d'installer les moyens de réduction du risque appropriés.
- Calendrier et délai de réalisation (4/4).

4.3.2.2 Consultation des travailleurs

Dans deux des quatre entreprises (A et D), le donneur d'ouvrage a consulté le travailleur appelé à partager l'espace de fonctionnement du robot. Toutefois, cette consultation consistait uniquement à expliquer le projet d'intégration au travailleur et à utiliser ses connaissances de la tâche à automatiser. Nonobstant cette explication, l'implication soutenue du travailleur tout au long du processus d'intégration n'était pas significative. À l'entreprise C, l'employeur a choisi de consulter un cadre qui était bien au fait de la tâche du travailleur plutôt que ce dernier pour des raisons internes. À l'entreprise B, le donneur d'ouvrage n'a pas consulté le travailleur puisqu'il a jugé l'installation non complexe.

Des points de vue sécurité et ergonomie, et en se basant sur Marsot *et al.* (2014), il est important que le travailleur visé soit impliqué dès l'élaboration du cahier des charges, et ce, peu importe l'importance des risques SST anticipés. Impliquer quelqu'un d'autre qui connaît ou a une idée de la tâche à robotiser ne règle que partiellement le problème de réduction des risques. En effet, questionner quelqu'un d'autre ne permet pas de saisir toutes les caractéristiques de l'activité de

travail. Le travailleur est le mieux placé pour renseigner sur l'exécution de sa tâche et des contraintes associées. Basé sur ces contraintes, il pourra aider l'intégrateur à choisir et à valider les moyens de réduction du risque. Grâce à la participation du travailleur, l'intégrateur risquera moins d'entraver l'exécution de la tâche du travailleur par la sélection d'un moyen de réduction du risque inadapté.

4.3.2.3 Interactions avec l'intégrateur

Dans trois des quatre entreprises (A, C et D), l'intégrateur était très impliqué dans l'élaboration du cahier des charges. En effet, dans deux cas, l'intégrateur était aussi le donneur d'ouvrage, car l'idée d'utiliser la cobotique venait de lui et, dans un autre cas, le principal donneur d'ouvrage avait demandé à l'intégrateur de rédiger lui-même le cahier des charges. Aux entreprises A et D, l'intégrateur était impliqué depuis le début du projet. À l'entreprise C, l'intégrateur a été impliqué en cours de projet, lorsque la tâche a été complètement automatisée et que l'entreprise a réalisé que la présence d'un travailleur dans ou à proximité de l'espace de travail collaboratif était nécessaire.

4.3.2.4 Recommandations concernant le cahier des charges

Il serait souhaitable que le cahier des charges soit un document formel et structuré qui aborde les points mentionnés à la sous-section 4.3.2.1. Ce document pourra être le fruit d'une élaboration itérative suivant l'évolution du projet (Marsot *et al.*, 2014). De surcroît, ce document doit considérer la tâche et l'activité futures du travailleur (c.-à-d., la collaboration avec le robot) en se basant sur la tâche actuelle (c.-à-d., activité de travail à automatiser). Marsot *et al.* (2014) proposent une telle démarche structurée et applicable par les PME avec, en exemple, une étude de cas dans Daille-Lefèvre *et al.* (2015). Cette démarche est abordée à la sous-section 4.4, après le tableau 13.

4.4 Intégration : processus observé

L'intégrateur devait se plier aux exigences du donneur d'ouvrage mentionnées à la sous-section 4.3. Les démarches relatives aux exigences de l'environnement de travail qui ont été suivies par les différents intégrateurs sont résumées au tableau 11. Le tableau 12 résume les démarches liées à la production tandis que le tableau 13 détaille celles associées à l'aspect sécurité.

Tableau 11 Étapes suivies par les intégrateurs concernant les exigences de l'environnement de travail

Démarche observée sur le terrain	Entreprise concernée
Respecter l'emplacement de la cellule cobotique choisi par le donneur d'ouvrage (ex. : lieu exigü devant une ou plusieurs allées passantes; solution automatisée reproductible dans d'autres succursales de l'entreprise).	A C D
Concevoir un système robotisé capable de fonctionner de manière sûre malgré les contraintes environnementales variées : poids des chariots élévateurs, présence de poussière ou de champ électromagnétique, température, luminosité, présence de vapeur ou de gaz corrosif.	A C D

Tableau 12 Étapes suivies par les intégrateurs concernant les exigences de production

Démarche observée sur le terrain	Entreprise concernée
S'informer de la tâche à automatiser.	A B C D
Choisir le robot (en allant à des salons de robotique ou en comparant les performances de plusieurs par rapport à la tâche à réaliser). N.B. Pour B et C, les robots étaient déjà présents dans l'entreprise.	A D
Se familiariser avec le fonctionnement du robot, apprendre à le programmer avec l'aide du fournisseur.	A C D
Choisir l'outil (le manipulateur) le plus adapté pour la tâche (ex., l'entreprise A a opté pour un outil se comportant comme une main humaine pour éviter de modifier les réglages du rideau optique déjà en place). N.B. Cette étape ne concernait pas l'entreprise C, car l'outil était celui en fonction depuis l'existence du robot conventionnel.	A B D
Trouver la manière la plus adaptée d'intégrer le robot au cycle de production (ex. : optimiser la trajectoire, étudier la communication bidirectionnelle entre le robot et les machines ou dispositifs de protection avec lesquels il devra communiquer, opter pour deux robots au lieu d'un pour satisfaire le cycle de travail requis par pièce).	A B C D
Réaliser l'automatisation de la tâche ou transformer le robot conventionnel en robot collaboratif, tout en ayant minimalement le même niveau de production qu'avant l'intégration de celui-ci (respect du temps de cycle initial).	A B C D

Tableau 13 Étapes suivies par les intégrateurs concernant les exigences de sécurité

Démarche observée sur le terrain	Entreprise concernée
Utiliser les normes en sécurité des machines : <ul style="list-style-type: none"> ○ CSA Z434-2003; ○ ISO 12100:2010, ISO 10218-1 et -2:2011, ISO 13849-1:2015 et -2:2012, EN 954-1; ○ ANSI/RIA R15.06-2012, logiciel SISTEMA. 	A C D
Entreprendre une appréciation du risque : <ul style="list-style-type: none"> ○ Identifier les risques liés au système robotisé <ul style="list-style-type: none"> - verbalement; - à travers des tests de fonctionnement du robot; - en mandatant un consultant externe. ○ Estimer et évaluer le risque <ul style="list-style-type: none"> - en mandatant un consultant externe. 	A C D B C B C D
Choisir les moyens de protection en fonction du point précédent et des autres types de contraintes.	A C D
Estimer le niveau de performance requis pour les fonctions de sécurité liées à certains des moyens de protection.	C D
Choisir les moyens de protection concernés en fonction : <ul style="list-style-type: none"> ○ du niveau de performance requis; ○ de la catégorie souhaitée. 	C D A C
Tester les moyens de protection sur un banc d'essai (hors de la cellule cobotique).	C D
Installer les moyens de protection en les branchant, selon le cas, au robot ou à l'équipement périphérique.	A C
Tester les moyens de protection dans l'environnement de travail, y apporter des ajustements s'il y a lieu.	A C
Valider le fonctionnement des moyens de protection : <ul style="list-style-type: none"> ○ par essais-erreurs (≈10 fois); ○ au fur et à mesure que l'installation évolue durant le processus d'intégration. 	A C

Les tableaux précédents montrent que les processus d'intégration variaient d'une entreprise à l'autre. Si les robots dits « collaboratifs » d'origine vus sur le terrain sont conçus conformément aux exigences normatives abordées au chapitre 3 (basé sur l'ISO 10218-1:2011), on constate que l'intégralité des exigences de sécurité relative à leur intégration décrites à la sous-section 5.11 de la norme ISO 10218-2:2011 n'est pas prise en compte, notamment en ce qui concerne l'appréciation des risques. Des points clés comme la détermination des limites (autres que celles liées à la production) de la machine, l'estimation et l'évaluation du risque pouvaient ne pas faire partie de la démarche, ainsi que la validation des moyens de protection pour s'assurer qu'ils réduisent le risque adéquatement. Cette validation est primordiale afin de prévenir des accidents (ex., blessure causée par un choc à la tête) et des maladies professionnelles (ex., déplacement de

TMS). Par le fait même, cette prévention permettrait d'éviter les coûts associés aux lésions professionnelles, tels que le changement de la qualité de vie du travailleur, les frais médicaux de la victime et les pertes en productivité. Dans plusieurs des entreprises visitées, la documentation du processus d'analyse n'a pas été consignée comme cela est prescrit à la section 7 de la norme ISO 12100:2010. Enfin, dans trois entreprises sur quatre, la prise en compte de la sécurité dans le processus d'intégration n'était pas prioritaire par rapport aux exigences de production. Il semble donc y avoir un besoin de clarifier ce que devrait être une démarche d'intégration qui inclut la sécurité.

Il serait souhaitable que la prévention des risques soit incluse plus tôt dans le processus d'intégration. En réalité, les exigences relatives à la production, à l'environnement et à la sécurité sont interdépendantes. Les unes ne doivent pas aller sans les autres à l'étape de la conception. Par exemple, pour l'entreprise D, le lieu d'implantation exigü, situé au carrefour de deux allées passantes, a influencé la distance à partir de laquelle une personne devait être détectée (distance courte). Par ricochet, cette distance relativement courte impose de diminuer la vitesse du robot en production, afin de garantir un arrêt surveillé à temps si le rideau optique est franchi. Cette vitesse devra vraisemblablement être plus lente que ce que le donneur d'ouvrage souhaitait au départ pour optimiser sa production. Par ailleurs, un rideau optique a été choisi au lieu d'un tapis sensible, car ce dernier ne peut résister aux passages répétés des chariots élévateurs qui circulent à proximité. Cela démontre que l'ensemble des exigences du donneur d'ouvrage influence les moyens de protection à mettre en place. Il faut donc les intégrer au plus tôt dans le processus de décision.

Toutes ces exigences auraient été plus faciles à mettre en œuvre si, dès le départ, un cahier des charges avait été bâti sur la base d'un dialogue ouvert et constructif entre le donneur d'ouvrage, l'intégrateur et les travailleurs concernés par l'installation, selon la notion de « prévention intégrée » expliquée dans Marsot *et al.* (2014). Ces auteurs proposent une démarche d'analyse fonctionnelle du besoin qui inclut l'aspect sécurité de l'usage futur de l'installation. Cette démarche consiste à établir les fonctionnalités du système à concevoir. Pour chaque fonctionnalité requise prévue, les parties impliquées discutent de la raison d'être, de l'action sur le processus, des personnes intervenant dans le processus, de la manière dont la fonction se déroulera (ex. : procédé, mode opératoire, outils nécessaires), de l'environnement de travail dans lequel s'exécutera la fonction, du moment et de la fréquence d'exécution. À chacun de ces éléments, la prévention est prise en compte en faisant correspondre les risques potentiels pour la santé et la sécurité des intervenants et les moyens d'y remédier en se basant sur des cas similaires. En effet, l'évaluation des risques doit permettre de considérer l'entièreté de la tâche collaborative en production, ainsi que l'environnement de travail associé (sous-section 5.11.2 de la norme ISO 10218-2:2011). Quoiqu'orientée principalement vers la conception de machine, cette démarche est transposable à l'intégration d'un nouveau poste de travail basé sur la collaboration homme-robot.

Par ailleurs, le rôle que peut jouer à cet égard le comité SST de l'entreprise (ex., entreprise A) est important puisque l'appréciation des risques est une démarche consensuelle. Toutefois, le principal intéressé – le travailleur qui allait interagir avec le robot – a été exclu. Dans les entreprises B et D, l'intégrateur a confié l'appréciation des risques à un consultant externe. À l'entreprise C, l'intégrateur était un consultant et l'appréciation des risques proprement dite lui

était confiée. Les intégrateurs rencontrés ont confié que la conception de la cellule cobotique dans son futur contexte de travail est difficile à réaliser, surtout en ce qui a trait à l'analyse des risques liés au robot, d'autant plus qu'il y a possibilité de contact physique avec l'humain.

Enfin, la participation du travailleur au processus d'appréciation des risques était généralement très faible ou inexistante. Or, ce dernier est celui qui trouvera son poste de travail modifié, qui connaît le mieux sa tâche principale à être automatisée et qui cohabitera ou interagira avec le robot tout en étant exposé aux risques. Alors, il est important de l'inclure activement dans le processus d'intégration pour des résultats optimaux. D'ailleurs, les sous-sections 4.3.1 et 4.3.3 de la spécification technique ISO/TS 15066:2016 abondent dans ce sens.

Ces constats montrent la nécessité d'outiller les entreprises pour qu'elles puissent réaliser la démarche d'appréciation des risques intégrant l'analyse de l'activité du travailleur, afin de prendre les décisions adéquates pour minimiser les risques relatifs à la cellule cobotique. Dans cette perspective, des outils comme des guides d'implémentation sécuritaire d'une cellule cobotique ou des documents présentant des études de cas plus détaillées que celle du chapitre 3 peuvent servir d'exemples à suivre aux entreprises.

4.5 Intégration : difficultés rencontrées

Les difficultés éprouvées à l'égard de la sécurité ont été principalement vécues par l'intégrateur. Ces difficultés étaient surtout d'ordre technique. Celles qui concernaient le donneur d'ouvrage portaient principalement sur le respect du calendrier et du budget. Certaines difficultés étaient déjà résolues par l'intégrateur au moment de la visite (tableau 14). D'autres étaient à l'étude (tableau 15).

Tableau 14 Difficultés résolues sur le terrain par les intégrateurs

Difficulté résolue à propos de la sécurité	Entreprise concernée
<p>Avoir le code de programmation et le comprendre pour pouvoir réduire la vitesse du robot lors d'une intrusion. L'intégrateur s'est fait aider par le fabricant.</p> <p>Éviter au travailleur de repositionner le robot plusieurs fois par jour, à chaque changement de production, afin de réduire le risque de TMS. Pour y arriver, le donneur d'ouvrage et l'intégrateur ont installé un rail autoajusteur de la position du robot selon le type de pièce à produire.</p>	A
Faire preuve de créativité pour trouver la trajectoire la plus sécuritaire et productive.	B
Détection d'une intrusion en dépit de l'environnement agressif, grâce à la découverte de la couleur et du matériau détectables par une caméra de reconnaissance de couleur. Cette découverte fait suite à plusieurs essais technologiques pendant au moins un an, selon diverses contraintes environnementales.	C

Tableau 15 Difficultés actuelles ou envisagées sur le terrain par les intégrateurs

Difficulté actuelle ou envisagée, à propos de la sécurité, dans le cadre de la réalisation du mode 3 ou 4 de fonctionnement collaboratif	Entreprise concernée
<p>Au sujet du mode 3, choix de la combinaison optimale (compromis entre sécurité et sûreté) des moyens de protection pour couvrir des zones actuellement non couvertes.</p> <p>Gérer la résistance au changement pour terminer le projet dans les délais prévus.</p> <p>Difficulté à statuer sur la distance de sécurité adéquate entre l'outil du robot et le travailleur, ainsi que le temps d'arrêt acceptable.</p>	C
<p>À propos du mode 3, difficulté à programmer le changement de régime (vitesse de production à vitesse réduite) à cause de :</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ l'espace restreint qui impose une distance d'arrêt courte et donc une vitesse de production réduite; ○ la vitesse réduite qui affecte la productivité de l'entreprise; ○ le choix des seuils de vitesses. <p>Quant au mode 4, difficulté à choisir les valeurs limites d'efforts.</p>	D

D'après les observations (tableau 15), le mode 3 avec une distance de séparation fixe semble difficile à mettre en place correctement. La spécification technique ISO/TS 15066:2016 apporte des précisions sur les calculs complexes qui y sont associés. Comme cela a été mentionné au chapitre 3, le temps d'arrêt et le temps de réduction de vitesse ne doivent pas se limiter au temps de réponse du robot, mais doivent inclure également le temps de réaction associé à chaque composant ajouté à la chaîne réalisant la fonction d'arrêt. Des recherches facilitant la compréhension de ces calculs seraient pertinentes pour les intégrateurs. Aussi, une telle recherche permettrait de clarifier les éléments de la spécification technique à prendre en considération.

4.6 Intégration : mesures de réduction du risque choisies

D'après la norme ISO 12100:2010, la réduction du risque succède à l'appréciation du risque. Quoiqu'aucune appréciation du risque en bonne et due forme n'eût été réalisée aux entreprises A, B, C et D au moment des visites, des mesures de réduction du risque avaient été choisies par les intégrateurs et les donneurs d'ouvrage de ces entreprises. Dans l'ensemble, ces mesures comprenaient : des moyens de protection pour réaliser les modes de fonctionnement collaboratif, la formation des travailleurs et la gestion des paramètres de configuration du robot et de la cybersécurité.

4.6.1 Modes de fonctionnement collaboratif choisis

Tout comme observé dans l'exemple théorique du chapitre 3, un mode ou une combinaison de modes était utilisé selon les besoins de production de l'entreprise et les préoccupations de sécurité à l'égard des travailleurs. Le mode 2, « Guidage manuel », n'a pas été utilisé dans les cas observés. Cela peut s'expliquer par le fait que 1) ce mode est adapté aux cas où la dextérité et le savoir-faire du travailleur ne peuvent être assumés complètement par un robot, en raison de la tâche du travailleur trop complexe à automatiser entièrement; 2) ce mode est avantageux quand l'interaction directe entre l'humain et le robot en mouvement est requise en production. Or, dans

les études de cas observées sur le terrain, la tâche principale initiale du travailleur pouvait être pleinement automatisée, car c'était principalement une tâche à faible valeur ajoutée. De plus, comme mentionnée plus tôt, la collaboration homme-robot a été choisie, dans les entreprises visitées, pour des motifs autres qu'un besoin d'interaction directe avec le robot en mouvement en production.

Les visites ayant eu lieu avant la publication de la spécification technique ISO/TS 15066:2016, l'analyse des moyens de protection utilisés pour réaliser les modes de fonctionnement collaboratif observés a été basée sur la norme en vigueur au moment du processus d'intégration, c.-à-d., ISO 10218:2011, parties 1 et 2. Toutefois, quelques remarques relatives à la spécification technique ISO/TS 15066:2016 ont été émises. À titre d'exemple, la description du mode 3 dans la norme ISO 10218-1:2011 et de sa mise en œuvre dans la norme ISO 10218-2:2011 ne prescrivaient pas d'arrêt nominal de sécurité contrôlé (c.-à-d. mode 1) alors que la spécification technique ISO/TS 15066:2016 l'inclut (figure 12).

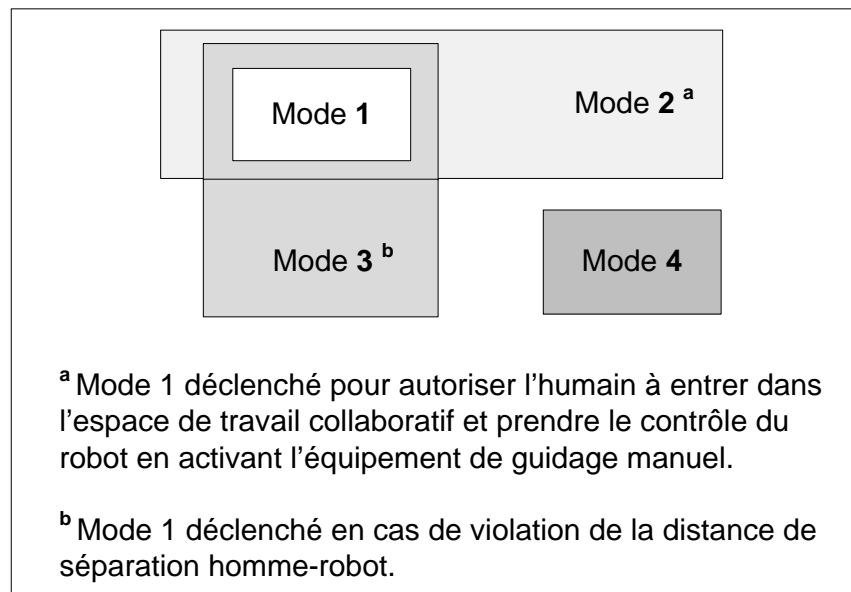


Figure 12 Modes de fonctionnement collaboratif et combinaisons systématiques prescrites par la spécification technique ISO/TS 15066:2016.

Les modes de fonctionnement collaboratif choisis par les entreprises visitées sont détaillés au tableau 16. Il s'agit des modes suivants :

- Mode 1 : arrêt nominal de sécurité contrôlé;
- Mode 3 : contrôle de la vitesse et de la distance de séparation;
- Mode 4 : limitation de la puissance et de la force par conception ou par commande.

Tableau 16 Modes de fonctionnement collaboratif utilisés, prévus ou en test dans les entreprises visitées

Mode	Cas étudié	Moyen de protection pour réaliser le mode	Moyen d'origine	Moyen ajouté
1	C (en test)	Arrêt du robot, si intrusion dans la zone de sécurité. Redémarrage automatique dès que la personne sort de la zone de sécurité et de celle d'avertissement. L'intrusion est détectée par une combinaison de scrutateurs laser de sécurité et de caméras de détection de couleur. Ajout d'un automate programmable industriel (API) dédié à la sécurité qui gère la réalisation des fonctions de sécurité.	x	✓
	D (prévu)	Rideau optique de sécurité qui déclenche un arrêt surveillé s'il est franchi.	x	✓
3*	A ₁ , A ₂ , A ₃ (utilisé)	Deux scrutateurs laser installés à une distance de séparation fixe par rapport au robot. Chacun détecte l'intrusion qui déclenche la vitesse réduite. Dans le cas A ₁ , elle vaut 25 % de la vitesse de production fixée à 1000 mm/s. Dans les cas A ₂ et A ₃ , elle vaut 50 % de la vitesse de production qui est déjà basse, mais de valeur inconnue. Délimitation au sol de l'espace de travail collaboratif.	x	✓
	C (en test)	Émission d'un avertissement et déclenchement d'une vitesse réduite lors d'une intrusion dans la zone d'avertissement. Cette zone d'avertissement correspond à une distance de séparation donnée par rapport à l'outil du robot. L'intrusion est détectée par une combinaison de 4 caméras de détection et de 6 scrutateurs laser de sécurité. Ajout d'un API dédié à la sécurité qui gère la réalisation des fonctions de sécurité. La valeur définitive de la vitesse réduite reste à déterminer.	x	✓
	D (prévu)	Scrutateur laser installé à une distance de séparation fixe par rapport au robot. Il détecte l'intrusion qui déclenche la vitesse réduite (valeur à déterminer selon les calculs de temps d'arrêt et de distance d'arrêt).	x	✓
4	A ₁ , A ₂ , A ₃ (utilisé)	Limitation de l'effort dont les seuils de force sont fixés par l'intégrateur.	✓	x
	B (utilisé)	Limitation de l'effort par la présence de ressorts aux articulations.	✓	x
	D (en test)	Limitation de l'effort dont les seuils de force seront fixés par l'intégrateur.	✓	x

✓ : oui; x : non

* Dans les entreprises utilisant le mode 3, la problématique du contrôle de la distance de séparation entre le travailleur et le robot est résolue en la figeant d'avance par l'emplacement fixe d'un dispositif de détection de présence. Le contrôle de la vitesse consiste à changer de régime une fois une présence détectée (passage de la vitesse de production à une vitesse réduite).

Les entreprises (C et D) utilisant le mode 1 l'ont fait pour éviter les collisions entre le robot et le travailleur. Aux entreprises A et C, le mode 3 était utilisé pour contrôler l'espace de travail collaboratif et assurer la sécurité des gens qui s'y trouvent. À l'entreprise D, bien que le donneur d'ouvrage reconnaisse que le mode 3 sécurise l'espace entourant le robot, ce mode a avant tout été choisi pour minimiser, grâce à la vitesse réduite du robot, la dégradation de ses freins au fil

de ses arrêts répétés. À l'entreprise A, la valeur de la vitesse était déterminée selon le ressenti visuel de l'intégrateur. Pour les cas C et D, les valeurs de vitesse réduite définitives seront déterminées en fonction d'une appréciation des risques et de tests. Le temps de réaction des dispositifs de protection, ainsi que la distance de sécurité ont été décisifs dans le choix des moyens de protection utilisés pour les modes 1 et 3 des entreprises C et D. Dans le cas de l'entreprise A, l'intégrateur a procédé par élimination : choisir le dispositif à prix raisonnable (donc scanner 3D exclus) pouvant être installé facilement (donc rideau optique horizontal exclu) et pouvant tolérer le passage de chariots élévateurs (donc tapis sensibles exclus). Le mode 4 était utilisé lorsqu'il faisait partie intrinsèque des caractéristiques physiques du robot ou de son asservissement (c.-à-d., système de régulation pour respecter une consigne). Lorsque ce mode était assuré par l'asservissement, l'intégrateur devait fixer la limite de la force d'impact physique acceptable pour l'humain.

4.6.2 Réflexions sur l'intégration des moyens de protection

4.6.2.1 Utilisation des concepts issus des normes en robotique collaborative

Dans la section XXI du RSST traitant des machines, il n'y a aucune référence à une norme canadienne, européenne ou internationale sur la sécurité des machines. En outre, les termes robots et cobots sont absents de ce règlement. Les entreprises se trouvent donc face à un vide réglementaire lorsqu'elles veulent utiliser un cobot, car la notion de partage de l'espace de travail n'existe pas. Toutefois, les normes existent pour indiquer aux intégrateurs les règles de l'art à suivre en robotique et plus précisément, en cobotique.

Cependant, la moitié des intégrateurs consultés n'a pas conçu l'application selon une logique de modes de fonctionnement collaboratif comme présentée dans les normes traitant de cobotique. Les entreprises A et B ont plutôt analysé l'application souhaitée, puis leurs besoins ont justifié les moyens de protection choisis. Ces moyens de protection consistaient en des dispositifs de détection d'intrusion et de la capacité intrinsèque du robot à s'arrêter lors d'une collision. Les intégrateurs rencontrés dans ces deux entreprises ont appris l'existence des modes de fonctionnement collaboratif grâce à la visite de l'équipe de recherche. Par la même occasion, ils ont appris l'existence de notions telles que le « niveau de performance (PL) » (ISO 13849-1:2015) et le « niveau d'intégrité de sécurité (SIL) » (CEI 62061:2005). Ce sont des notions requises pour répondre à l'exigence de performance commune aux quatre modes de fonctionnement collaboratif : avoir des fonctions de sécurité de PL d, catégorie 3 (cf. sous-section 5.4.2 de la norme ISO 10218-1:2011). Tout de même, notons que cette norme admet d'autres critères de performance pour le système de commande, pourvu que :

Les résultats d'une appréciation du risque globale réalisée sur le robot et son application prévue peuvent justifier l'application d'une performance du système de commande relatif à la sécurité autre que celle spécifiée [c.-à-d., PL d, catégorie 3]. La sélection de l'un de ces autres critères de performance relatifs à la sécurité doit être spécifiquement identifiée et des restrictions et des avertissements appropriés doivent être mentionnés dans les informations pour l'utilisation fournies avec l'équipement concerné (ISO 10218-1:2011).

En revanche, à l'entreprise A, l'intégrateur connaissait la notion de catégorie. Exceptionnellement, le cobot de l'entreprise B ne rencontrait pas le niveau de performance exigé par la norme ISO 10218-1:2011. Malgré cela, le robot est vendu et utilisé comme un cobot. Cela s'expliquerait par le fait que les caractéristiques physiques de ce robot limitent intrinsèquement sa force d'impact, ainsi que sa vitesse (ce cobot a des moteurs peu puissants). En effet, il s'agit d'un robot aux formes arrondies avec des amortisseurs aux articulations. Aussi, un atout de ce cobot est sa capacité de communiquer visuellement avec le travailleur, ce qui permet à ce dernier d'anticiper ses mouvements.

Dans les entreprises C et D, les intégrateurs connaissaient les normes en vigueur sur la robotique collaborative et sur les systèmes de commande relatifs à la sécurité. Alors, ils ont pu adopter une démarche systématique qui optimise ainsi le processus d'intégration. Ils ont d'abord réfléchi au mode de fonctionnement collaboratif à mettre en œuvre avant de choisir les dispositifs de protection adaptés. En effet, en optant pour un mode, on a déjà les exigences de sécurité minimales à respecter pour protéger les travailleurs qui pénétreront dans l'espace de travail collaboratif. Ensuite, il restera à choisir les moyens de protection pouvant satisfaire ces exigences. Contrairement aux entreprises C et D, les entreprises A et B ont adopté une démarche intuitive.

4.6.2.2 Fiabilité des systèmes de commandes relatifs à la sécurité

À l'entreprise C, la méthode simplifiée de la norme ISO 13849-1:2015 était inapplicable, car tous les dispositifs de protection ne sont pas « de sécurité » : les scrutateurs laser le sont, mais pas les caméras. Pour contourner cette difficulté, l'intégrateur applique les principes fondamentaux de la norme ISO 13849-1:2015 issus de la norme caduque EN 954 : 100 % des principes de l'EN 954 et 80 % des principes de la norme ISO 13849-1 ont été respectés selon l'intégrateur. Par exemple, les modes de défaut des différents dispositifs ont été étudiés et testés sur une longue période. L'intégrateur a géré les agressions environnementales (ex. : poussières; champs électromagnétiques). Comme le risque est très élevé, des dispositifs de protection redondants hétérogènes sont prévus (6 scrutateurs laser et 4 caméras de détection) pour garantir la détection de présence, malgré l'environnement agressif et variable. Toutefois, l'intégrateur devra trouver un équilibre entre la fiabilité et la sécurité, car plus le nombre de composants augmente, plus la fiabilité globale du système diminue.

À l'entreprise D, l'estimation du risque conduit l'intégrateur à un niveau de performance requis PL_r (rappelons que le robot a été acquis avant l'estimation du risque). Selon l'intégrateur, cela a justifié l'achat d'un scrutateur laser PL_e . Cependant, rappelons que la partie traitement des fonctions de sécurité du robot est de PL_d , catégorie 3. Or, d'après le principe de combinaison des parties de systèmes de commande relatives à la sécurité (tableau 11 de la norme ISO 13849-1:2015), il est impossible d'obtenir un niveau de performance globale PL_e si l'un des composants est de PL inférieur. Alors, dans le cas de l'entreprise D, la collaboration homme-robot devrait être évitée, sauf si l'entreprise modifie sa cible de niveau de performance advenant que le risque ait été surestimé. Sinon, le robot dit « collaboratif » d'origine devrait être utilisé comme un robot conventionnel, c.-à-d., dans une enceinte de protection.

Ce constat montre, d'une part, la nécessité d'estimer le risque de l'activité future avant d'acquérir un robot dit « collaboratif » afin de s'assurer, avant l'acquisition, qu'il réponde aux besoins de sécurité. D'autre part, ce constat montre que les robots dits « collaboratifs » d'origine ne sont pas systématiquement utilisés sans protecteur ou dispositifs de protection supplémentaires. Or, le qualificatif « prêt à l'emploi » (*plug-and-play*) attribué aux robots dits « collaboratifs » laisse croire que leur intégration est immédiate et ne nécessite pas de moyens de protection, ce qui n'est pas toujours le cas. L'appréciation des risques relatifs à l'installation (c.-à-d., le robot, les équipements avoisinants affectant la sécurité du travailleur en activité, les contraintes auxquelles le travailleur doit se soumettre) dictera si le robot peut être utilisé en collaboration avec un travailleur. Encore une fois, une appréciation des risques incluant une analyse de l'activité du travailleur est souhaitable dans un tel contexte. Finalement, l'usage du logiciel SISTEMA (IFA, 2016), comme le fait l'entreprise D pour concevoir ses fonctions de sécurité, facilite sa tâche. Cependant, il faut connaître les normes sur lesquelles se fonde ce logiciel (ISO 13849-1 et 2), afin de l'utiliser et d'interpréter ses résultats convenablement.

4.6.2.3 Gestion des collisions homme-robot (mode 4)

L'entreprise D souhaite utiliser le mode 4 comme moyen de protection supplémentaire. Elle compte se baser sur l'abaque de valeurs du document de spécification technique ISO/TS 15066:2016 pour ajuster le seuil de la force du cobot. Cet exercice devra être rigoureux, car la spécification technique ISO/TS 15066:2016 précise dans son introduction que les opérations collaboratives représentent un domaine en évolution; les valeurs qui y sont proposées évolueront donc dans les futures versions du document.

Il est conseillé que les valeurs choisies pour l'application collaborative soient discutées avec un ergonome et avec les travailleurs. D'ailleurs, la spécification technique ISO/TS 15066:2016 reconnaît les avantages de l'apport de l'ergonomie (ex., l'amélioration de la posture du travailleur) dans les installations où les humains et les robots collaborent. Cette science permet aussi d'étudier l'ensemble de l'activité de travail associé au travailleur en poste afin d'apporter d'autres améliorations, telles que le choix d'une cadence appropriée de la production pour réduire la charge mentale du travailleur, l'augmentation de ses marges de manœuvre, le choix du positionnement du robot de manière à éviter tout contact avec la tête. En effet, les valeurs d'effort admissibles de l'annexe A de la spécification technique ISO/TS 15066:2016 excluent la tête. Or, dans certaines des entreprises visitées, le robot se déplaçait à la hauteur de la tête du travailleur. De plus, il semble très difficile pour un intégrateur de certifier que jamais un travailleur ne va se pencher pour une raison quelconque, et ainsi placer sa tête dans la zone de déplacement du robot.

De plus, en utilisant le mode 4, il faut s'assurer que le robot est capable de s'arrêter, quelles que soient sa vitesse et sa position. Cela semble difficile à réaliser pour certains fabricants de robots dits « collaboratifs » d'origine, car des robots de ce type, qui outillent les entreprises A et D, détectaient une collision uniquement à faible vitesse.

4.6.2.4 Autres moyens de réduction du risque

Équipements de protection individuelle

Au-delà des moyens de protection associés aux modes de fonctionnement collaboratif, des équipements de protection individuelle (EPI) étaient utilisés par les travailleurs, à la demande de l'employeur : lunettes de protection, bouchons auditifs, souliers de sécurité. Les EPI portés par les travailleurs partageant l'espace de travail du robot étaient identiques à ceux qu'ils utilisaient avant l'application cobotique. Ainsi, l'usage de la cobotique dans l'entreprise n'a pas modifié le port des EPI.

Arrêt et arrêt d'urgence

Un bouton d'arrêt d'urgence est aussi disponible pour arrêter le robot en cas d'incident. Toutefois, son actionnement n'arrête pas les équipements dangereux avoisinants, tels que la presse du cas A₁. Comme le prescrit l'article 193 du Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) du Québec, il est important que :

Tout dispositif d'arrêt d'une machine faisant partie d'un groupe de machines conçues pour fonctionner en association les unes avec les autres, y compris un dispositif d'arrêt d'urgence, doit pouvoir arrêter, outre cette machine, celles situées en amont ou en aval si leur maintien en marche constitue un danger pour la sécurité des travailleurs (Gouvernement du Québec, 2016).

En effet, il est déjà arrivé un accident (EPICEA³, dossier 14546) où le travailleur intervenant sur un robot conventionnel et qui récupérait des pièces moulées a été blessé par celui-ci lorsqu'il a démarré inopinément. L'ouverture des portes du protecteur a provoqué l'arrêt sûr de la presse à injection, mais pas celui du robot. La situation inverse est tout aussi envisageable dans le cas d'entreprises où la commande d'arrêt d'un robot collaboratif provoque sa mise en sécurité, mais pas celle de la machine avoisinante.

Les intégrateurs peuvent consulter la norme ISO 13850:2015 pour connaître et appliquer les principes normatifs de conception d'une fonction d'arrêt d'urgence.

Formation du personnel

À l'entreprise A, l'intégrateur a donné une formation pratique au travailleur concernant sa nouvelle tâche. Une formation a également été donnée au personnel de maintenance et de réglage.

Aux entreprises B et D, il est prévu que l'intégrateur forme le travailleur pour une prise en main rapide de l'installation cobotique.

À l'entreprise C, la décision de former le travailleur une fois l'intégration complétée est en cours de réflexion. Pour l'instant, le donneur d'ouvrage juge qu'il y aura peu d'impact sur la tâche du travailleur. Malgré cela, l'équipe de recherche estime qu'il sera pertinent d'informer le travailleur sur le fonctionnement du système de détection de présence, afin qu'il sache quand et où intervenir en sécurité dans l'espace de travail collaboratif.

³ <http://www.inrs.fr/publications/bdd/epicea.html>

En définitive, toutes les personnes concernées par la cellule cobotique devraient être informées du fonctionnement et des risques de l'installation. Les travailleurs qui collaborent avec le robot devraient suivre une formation pratique sur leur nouveau poste de travail.

Gestion des paramètres de sécurité et du programme

La gestion des valeurs des différents paramètres du programme (fonctionnels et de sécurité) du cobot demeure capitale pour éviter leur changement accidentel ou inadéquat. Les paramètres de sécurité peuvent comprendre, par exemple, des valeurs limites de vitesse, d'effort ou de coordonnées cartésiennes à ne pas dépasser. La sous-section 5.4.2 de la spécification technique ISO/TS 15066:2016 avance que les paramètres de sécurité doivent être protégés par l'usage d'un mot de passe ou autre mesure équivalente, contre des modifications involontaires et celles non autorisées. La norme ISO 10218-1:2011 exige que les systèmes de commande utilisant des butées logicielles nominales de sécurité (cf. glossaire) soient modifiables seulement par le personnel autorisé. De plus, elle exige que cette modification soit protégée et sécurisée par la saisie d'un mot de passe.

À l'entreprise C, un plan de gestion organisationnelle est prévu pour encadrer la sécurité informatique, dont la gestion des mots de passe et des accès et des modifications aux programmes des API (ex., procédure pour contournement sécuritaire). À l'entreprise D, seul l'intégrateur gère les valeurs des paramètres configurés pour la sécurité. Il accède aux paramètres à l'aide d'un mot de passe qui lui seul connaît (cependant, un mot de passe pour le programme en général n'est pas encore prévu). Ces deux exemples montrent de bonnes pratiques à appliquer. À noter qu'au moins 2 accidents graves ou mortels sont survenus au Québec lors de modifications de programme de machines automatisées (CNESST, 2002; CNESST, 2004). Il faut donc un plan de gestion du cycle de vie du logiciel (CEI 61508-3 2010) et un plan de gestion des modifications (CAN/CSA C22.2 N° 0.8-12, 2012).

À noter que la possibilité de paramétrer et de commander le cobot à distance a été observée dans les applications des entreprises B (vitesse de préhension et de pose de la pièce manutentionnée) et C (en cas de déblocage, téléopération à partir d'une salle de contrôle). Ces situations nécessitent une gestion particulièrement rigoureuse des conditions d'accès aux paramètres liés à la sécurité (ex., vitesse de déplacement du cobot).

4.7 L'après-intégration observée

4.7.1 Documentation issue de l'intégration

Une fois le robot intégré, un mode d'emploi de la cellule cobotique doit être rédigé (cf. sous-section 7.2 de la norme ISO 10218-2:2011). Ce document devra être rendu disponible aux travailleurs et autres membres du personnel concernés, spécialement les nouveaux employés, afin d'assurer une uniformité et de la rigueur dans la formation. De même, la documentation technique doit être maintenue à jour et regroupée en un même lieu connu de ces personnes, afin de minimiser les erreurs lors des réparations de la cellule cobotique ou de mises à jour de son système automatisé ou informatique. Ces pratiques, inexistantes aux entreprises A et B, étaient

déjà appliquées à l'entreprise D concernant d'autres machines. Cette entreprise comptait appliquer cette même démarche pour sa cellule cobotique.

4.7.2 Bilan de l'entreprise

Lors de nos observations, seule l'entreprise A avait des cellules cobotiques en service. Pour cette entreprise, les objectifs du donneur d'ouvrage à l'égard des facteurs économiques, humains, environnementaux et autres ayant motivé son choix pour la cobotique ont été atteints. Pour l'entreprise B, ce sera à leur client (cf. tableau 6) de vérifier si les objectifs associés à ces facteurs sont rencontrés. En ce qui a trait à l'entreprise C, le donneur d'ouvrage pouvait déjà voir les gains en matière de productivité de son installation, même si celle-ci était encore à l'étape de test. Quant à l'entreprise D, il était encore trop tôt pour dresser un bilan de l'installation en cours. Malgré tout, des avantages de la cobotique étaient envisageables par les entreprises C et D dont les processus d'intégration étaient en cours.

4.7.3 Type d'interaction avec le travailleur

La collaboration observée ou prévue dans les entreprises visitées se résume essentiellement au partage de l'espace de travail, en pleine production, pour superviser le fonctionnement du robot, gérer un incident, vérifier la qualité de production, récupérer un lot de pièces produites ou pour nettoyer. Les avantages et les inconvénients pour le travailleur, relatés par les participants, au sujet de la mise en place de ces installations collaboratives sont détaillés au tableau 17 et au tableau 18. Les incidents survenus dans les entreprises visitées et qui nous ont été partagés sont décrites au tableau 19.

Tableau 17 Impacts positifs de la cobotique selon les témoignages des participants

Impact positif pour le travailleur	Entreprise
Diminution de la charge physique et des risques de TMS, car la manutention principale est assumée par le robot.	A B D
Pas de charge mentale liée à l'anticipation des mouvements du robot, car la durée de l'intervention du travailleur dans l'espace de travail collaboratif est généralement brève.	A
Diminution des risques liés au procédé ou aux machines proches du robot (ex., dans le cas A ₁ , le travailleur passe 1 h près de la presse au lieu de 8 h comme auparavant).	A C
Interaction intuitive lors de la collaboration.	B
Tâche plus intéressante et plus valorisante que l'ancienne.	A C D
Plus de marge de manœuvre dans ses activités, car la présence permanente de l'opérateur n'est plus requise comparativement à la tâche initiale.	A

Tableau 18 Impacts négatifs de la cobotique selon les témoignages des participants

Impact négatif pour le travailleur	Entreprise
Risque de coincement entre l'outil et le bras du robot, ou entre le robot et une paroi fixe.	D
Risque de pincement par l'outil du robot ou entre les articulations de celui-ci.	B
Risque de coupure par les bavures de la pièce portée.	A
Risque de choc (collision) avec le cobot ou la pièce portée.	A B C D
Appréhension par rapport à la pièce manutentionnée, car son déplacement est imprévisible.	A B
Charge mentale : surveillance difficile à gérer quand plus d'un robot tombent en défaut simultanément.	A
Nécessité de développer de nouvelles stratégies pour éviter les collisions. Par exemple, toujours faire face au robot et l'avoir dans son angle de vision, peu importe l'activité en cours dans l'espace de travail collaboratif.	A
Posture contraignante : <ul style="list-style-type: none"> • Se pencher sous le robot lors de la vérification de la qualité des pièces ou de la récupération de la production. • Lors de l'apprentissage, car le bras du robot à manipuler est placé en hauteur. L'apprentissage dure environ 5 min. 	A B

Tableau 19 Incidents survenus dans les entreprises visitées

Incident vécu	Cause	Possibilité d'amélioration	Entreprise
Bris répétés des moteurs au niveau des joints malgré le respect de la charge utile	Le couple agissant de manière cyclique sur les joints conduit au bris du moteur. Ce couple est créé par la taille et le poids de l'outil et de la pièce en mouvement portée par le robot.	Considérer ce facteur lors du choix de l'outil et du robot. Choisir la trajectoire la moins exigeante mécaniquement. Demander au fabricant d'améliorer la robustesse des moteurs.	A
Être pris au dépourvu par le robot	Oscillations du bras du robot dues à un problème d'asservissement.	Demander au fabricant de corriger l'asservissement.	B

Globalement, les travailleurs rencontrés avaient une appréciation positive de leur installation cobotique, notamment parce que leur charge physique de travail se trouvait diminuée. Ce changement était également une opportunité pour eux d'exercer une tâche moins monotone et plus valorisante que l'ancienne (ex., devenir le superviseur du robot). Face à la nouveauté apportée par la cobotique (c.-à-d., l'absence complète ou partielle de protecteurs), les travailleurs ont diminué leur appréhension en testant l'arrêt du robot lors de collisions. Finalement, leurs craintes sont davantage liées aux objets manutentionnés par le robot (ex., tôle métallique) qu'au robot lui-même. Il est donc important de considérer, lors de l'appréciation du risque associé aux tâches dans la cellule cobotique, les phénomènes dangereux rattachés aux pièces que manipulera le robot, ainsi que ceux liés à son outil. Par exemple, un couteau manipulé par un robot est un phénomène dangereux à prendre en compte pour évaluer l'acceptabilité du risque dans un contexte de collaboration homme-robot. Les risques mentionnés au tableau 18 ont été confirmés

en utilisant les installations en service ou lors de la phase de test. Quant au tableau 19, des possibilités d'amélioration sont proposées pour pallier les causes des incidents déjà vécus.

L'implantation de la robotique collaborative étant encore à ses débuts dans les entreprises visitées, il serait intéressant d'y faire un suivi dans quelques années. Cela permettrait de documenter, avec plus de recul, les incidents, les risques et les avantages de cette technologie pour les travailleurs. De plus, comme il n'y avait pas d'implication soutenue des travailleurs dans le processus de spécification des besoins et le processus d'intégration, il serait intéressant de voir si des risques non documentés par le donneur d'ouvrage et l'intégrateur, faute de consultation récurrente auprès du travailleur, ont eu des répercussions sur l'exploitation de la cellule cobotique.

5. CONCLUSION

Ce projet de recherche exploratoire comporte deux volets : 1) un volet théorique sur trois robots destinés à collaborer avec l'humain, puis 2) un volet-terrain dans quatre entreprises du Québec.

L'étude théorique a permis de sélectionner trois robots, chacun d'un fabricant différent, afin d'étudier les fonctions relatives à la sécurité qu'ils proposent pour la mise en œuvre de cellules robotiques collaboratives. Elles ont ainsi été classifiées afin de constater que la majeure partie des fonctions proposées se résume en fonctions d'arrêt et en fonctions de surveillance. Bien que les fonctions relatives à la sécurité des divers fabricants possèdent des similitudes, plusieurs différences techniques demeurent présentes. Rappelons, par exemple, le tableau 5 qui montre, pour la fonction F5, qu'après un arrêt de protection, le robot sera réinitialisé automatiquement ou par un réarmement externe, selon le fabricant. Ces différences techniques peuvent avoir des répercussions sur la sécurité. Il est donc nécessaire que l'intégrateur demeure vigilant quant au choix et à la mise en œuvre de ces fonctions. De plus, il faut se rappeler que la mise en œuvre d'une fonction de sécurité peut nécessiter l'utilisation de dispositifs externes, ainsi que la combinaison de plusieurs fonctions relatives à la sécurité issues de cartes électroniques ou modules dédiés à la sécurité.

La disponibilité de cartes ou modules dédiés à la sécurité pouvant être intégrés à des robots conventionnels pour les rendre collaboratifs crée une ère de transition. L'acquisition de ces cartes ou modules étant beaucoup moins coûteuse que l'achat d'un robot collaboratif, il ne serait pas étonnant que les utilisateurs de robots conventionnels soient tentés de les transformer en robots collaboratifs. La vigilance de l'intégrateur sera de mise, spécialement dans pareil cas, puisqu'il devra choisir la vitesse et la force réduites les mieux appropriées, pour favoriser la maîtrise des risques des robots conventionnels qui sont intrinsèquement puissants.

L'étude-terrain a montré que plusieurs facteurs influencent les choix relatifs à une application collaborative. Étant donné que l'échantillon analysé était de petite taille (4 entreprises), il serait pertinent d'interroger d'autres entreprises et de mener une revue de littérature pour inventorier de manière exhaustive ces facteurs. Cet inventaire permettrait de développer un outil d'aide à la sélection du type de robots à l'intention des utilisateurs et des intégrateurs. En l'absence d'un tel outil, voici des éléments sur lesquels ils peuvent s'interroger avant de se lancer dans un projet d'intégration d'un robot : le niveau de performance requis (PL_r) pour les fonctions de sécurité du robot afin de réduire les risques associés à la collaboration (le PL_r sera suggéré par l'analyse des risques), le coût, la précision requise pour répondre à la tâche et la qualité recherchée, la charge utile (poids de l'outil requis pour la tâche combiné au poids de la pièce manutentionnée), le besoin de réduire les contraintes physiques, les contraintes spatiales, le besoin de visibilité et de notoriété de l'entreprise auprès de ses concurrents et clients, la possibilité d'automatisation complète ou partielle de la tâche principale du travailleur. Enfin, le degré d'automatisation possible de la tâche du travailleur pour la future installation guidera le choix des modes de fonctionnement collaboratif requis.

Comme l'a montré le cas de l'entreprise C, les modes 1 et 3 observés ne sont pas toujours réalisables avec des fonctions de sécurité dont la fiabilité est connue et calculable selon la méthode simplifiée de la norme ISO 13849-1:2015. La fiabilité sera facilement estimable

seulement si tous les dispositifs de détection sont « de sécurité », donc absence de dispositifs de vision ou autre dont la fiabilité est inconnue (ex. : caméras, Kinect). Quant à l'autre mode observé sur le terrain, soit le mode 4, il devra être utilisé avec précaution puisque le document technique ISO/TS 15066:2016 qui suggère des valeurs limites vient d'être publié et est en cours d'évolution. De plus, ce document est une spécification technique et non une norme. Idéalement, le risque de collision doit être considéré comme un risque résiduel qui, dans certains cas, peut être couvert par le mode 4. La spécification technique ISO/TS 15066:2016 pourra guider l'intégrateur, dans le cadre d'une appréciation des risques, pour choisir les valeurs limites adaptées. Comme le suggère la spécification technique, l'intervention d'un ergonomiste est souhaitable pour valider les valeurs limites choisies tout en restant dans le cadre SST réglementaire et législatif du Québec.

Cette étude a permis de noter des besoins du terrain, principalement :

- La nécessité d'une démarche d'appréciation des risques associés à une installation cobotique;
- Le bien-fondé d'associer le travailleur dont la tâche sera automatisée au processus de détermination des besoins et d'intégration de ce genre d'installations;
- Le choix optimal de dispositifs de détection de présence pour mettre en œuvre le mode 1 ou 3 de fonctionnement collaboratif, dans un contexte où les contraintes environnementales représentent un facteur prépondérant dans la sélection de ces dispositifs;
- Le choix adéquat des valeurs limites pour le mode 4 de fonctionnement collaboratif. La spécification technique ISO/TS 15066:2016 précise que les valeurs limites qu'elle propose sont appelées à évoluer. Alors, cela justifie des recherches pour questionner ces valeurs selon des contextes de situation de travail précis ou aller jusqu'à proposer des valeurs sécuritaires selon le contexte étudié. Pour cela, la contribution d'un biomécanicien est souhaitée;
- La comparaison pratique des performances techniques de différents robots, afin d'illustrer de manière concrète comment la réalisation d'un mode varie d'un robot à l'autre. Par le fait même, les limites techniques de certains robots à réaliser un mode seront mieux connues. Cette dernière suggestion de recherche serait une version pratique du volet théorique présenté au chapitre 3 de ce rapport.

BIBLIOGRAPHIE

AFNOR (Association française de normalisation). (2014) *Robots et composants robotiques – Exigences de sécurité – Robots non médicaux pour les soins personnels*. NF EN ISO 13482. Paris: AFNOR.

Ahmed M.R. et Kalaykov, I. (2010) *Semi-active Compliant Robot Enabling Collision Safety for Human Robot Interaction*, Communication présentée à IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Xi'an, Chine, p. 1932-1937.

ANSI (American National Standards Institute). (2012) *American National Standard for Industrial Robots and Robot Systems – Safety Requirements*, ANSI/RIA R15.06-2012. Ann Arbor, Michigan, États-Unis : ANSI.

Atain Kouadio, J.-J. et Sghaier, A. (2015) *Quels retentissements pourraient avoir les robots d'assistance physique (RAP) sur la santé sécurité et la performance en entreprise?*, Communication présentée au 50^e Congrès international de la SELF (Société d'ergonomie de langue française), Paris, France, p. 1-8.

Atain Kouadio, J.-J. *et al.* (2014) « Quelle place pour les robots d'assistance physique en 2030? », *Hygiène et sécurité du travail*, (235), p. 64-68.

Baraglia, J., Cakmak, M., Nagai, Y., Rao, R. et Asada, M. (2016) *Initiative in Robot Assistance during Collaborative Task Execution*. Communication présentée à The 11th ACM/IEEE International Conference on Human Robot Interaction, Nouvelle-Zélande (p. 67-74).

Baudoin, J. et Bello, J.P. (2015) *Conception de presses à servomoteur – Préconisations de sécurité* (Guide n° NS 338). Vandoeuvre-lès-Nancy, Lorraine, France: Institut national de recherche et de sécurité (INRS).

Baudoin, J. et Bello, J.P. (2010) *Guide pratique d'application de la norme NF EN 62061*, (Rapport technique n° IET/10RT-257/JBn/JBo). Vandoeuvre-lès-Nancy, Lorraine, France: Institut national de recherche et de sécurité (INRS).

Buiu, C. et Popescu, N. (2011) Aesthetic emotions in human-robot interaction. Implications on interaction design of robotic artists, *International Journal of Innovative Computing, Information & Control*, 7(3), p. 1097-1107.

CEI (Commission électrotechnique internationale). (2010) *Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité – Partie 3 : Exigences concernant les logiciels*, CEI 61508-3:2010. Genève: CEI.

CEI (Commission électrotechnique internationale). (2009) *Safety of machinery – Electrical equipment of machines – Part 1: General requirements*, CEI 60204-1:2005+A1:2008. Genève: CEI.

Charpentier, P. et Sghaier, A. (2013) « L'homme au travail et le robot : une relation à inventer », *Hygiène et sécurité du travail*, (231), p. 84-88.

Charpentier, P. et Sghaier, A. (2012) *Industrial Robotics: Accident analysis and Human-Robot Coactivity*, Communication présentée au SIAS (Safety of Industrial Automated Systems), Montréal, Québec, Canada, p. 170-175.

Colgate, J.E., Peshkin, M. et Klostermeyer, S.H. (2003) *Intelligent assist devices in industrial applications: A review*, Communication présentée au IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, Nevada, États-Unis, p. 2516-2521.

Green, S.A., Billingham, M., Chen, X. et Chase, J.G. (2008) « Human-robot collaboration: A literature review and augmented reality approach in design », *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 5(1), 1-18.

CNESST (Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail). (2004) *Rapport d'accident grave et mortel: accident grave survenu à un mécanicien le 24 juin 2004, à l'usine Kruger/Wayagamack inc. de Trois-Rivières*, (Rapport d'enquête n° EN-003483), Montréal, Québec, Canada: CNESST.

CNESST (Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail). (2002) *Rapport d'enquête d'accident : accident survenu à un travailleur, à l'emploi de la firme Comact St-Georges inc., le 30 août 2000 à l'usine de sciage Blanchette & Blanchette inc. à St-Gérard*, (Rapport d'enquête n° EN-003311), Montréal, Québec, Canada: CNESST.

CSA (Association canadienne de normalisation). (2012) *Code canadien de l'électricité, deuxième partie – Exigences générales – Safety functions incorporating electronic technology*, C22.2 NO. 0.8-12, Toronto, Ontario, Canada: CSA.

CSA (Association canadienne de normalisation). (2014) *Industrial robots and robot systems*, CAN/CSA-Z434-14. Mississauga, Ontario, Canada : CSA.

Daille-Lefèvre, B., Dequaire, E., Roignot, R. et Fadier, E. (2015) « Acheter une machine : comment décrire les usages attendus? », *Hygiène et sécurité du travail*, (239), 70-73.

De Graaf M.M.A. et Ben Allouch, S. (2013) *The relation between people's attitude and anxiety towards robots in human-robot interaction*, Communication présentée à IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), Gyeongju, Corée, p. 632-637.

DGUV (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V.). (2013) *How should workplaces involving collaborative robots be designed?*, (Fiche n° 0348), Berlin, Allemagne : DGUV.

Falco, J., Marvel, J. et Norcross, R. (2012) *Collaborative Robotics : Measuring Blunt Force Impacts on Humans*, Communication présentée au Safety of Industrial Automated Systems (SIAS), Montréal, Québec, Canada, p. 186-191.

Fritzsche, M., Elkmann, N. et Schulenburg E. (2011) *Tactile sensing: A key technology for safe physical human robot interaction*, Communication présentée au 6th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), Lausanne, Suisse, p. 139-140.

Fryman, J., Arbor, A. et Matthias, B. (2012) *Robotic Industries Association, Safety of Industrial Robots: From Conventional to Collaborative Applications*, Communication présentée au Safety of Industrial Automated Systems (SIAS), Montréal, Québec, Canada, p.198-203.

Fujikawa, T. et Kubota, M. (2012) *Evaluation of Injury Level and Probability for Risk Assessment of Mobile Robots*, Communication présentée au Safety of Industrial Automated Systems (SIAS), Montréal, Québec, Canada, p. 180-185.

Gimélec (2013) *Industrie 4.0 – L'usine connectée*, Paris, France : Gimélec.

Glagowski, T., Pedram, H. et Shamash, Y. (1992) « Human factors in robot teach programming », Dans M. Rahimi et W.Karwowski (Édit.), *Human robot interaction*, p. 16-47. Londres, Angleterre: Taylor & Francis.

Gouvernement du Québec. (2016) Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST), http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/S_2_1/S2_1R13.HTM

Gray, S.V., Wilson, J.R. et Syan, C.S. (1992) « Human control of robot motion: orientation, perception and compatibility », Dans M. Rahimi et W.Karwowski (Édit.), *Human robot interaction* (p. 48-64). Londres, Angleterre: Taylor & Francis.

Haddadin, S. *et al.* (2011) « Towards the Robotic Co-Worker », *Robotics Research*, 261-282.

Haddadin, S., Albu-Schäffer, A. et Hirzinger, G. (2007) *Safety Evaluation of Physical Human-Robot Interaction via Crash-Testing*, Communication présentée à Robotics: Science and Systems III, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA, p. 1-8.

Huelke M. et Ottersbach, J. (2012) *How to approve Collaborating Robots – The IFA force pressure measurement system*, Communication présentée au Safety of Industrial Automated Systems (SIAS), Montréal, Québec, Canada, p. 204-209.

IFA (*Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung*). (2016). SISTEMA [Logiciel]. Tiré de <http://www.dguv.de/ifa%3B/praxishilfen/practical-solutions-machine-safety/software-sistema/alle-sistema-versionen/index.jsp>

IFR (International Federation of Robotics). (2015) Executive Summary - World Robotics 2015 Industrial Robots. IFR.

Ikeda, H., Niwa K. et Shimizu, Y. (2012) *Development of a Self-Check Sheet for Safety Design of Human-Collaborative Robots*, Communication présentée au SIAS (Safety of Industrial Automated Systems), Montréal, Québec, Canada, p. 210-215.

ISO (Organisation internationale de normalisation). (2016) *Robots and robotic devices – Collaborative robots*, ISO/TS 15066. Genève : ISO.

ISO (Organisation internationale de normalisation). (2015a) *Sécurité des machines – Fonction d'arrêt d'urgence -- Principes de conception*, ISO 13850:2015. Genève : ISO.

ISO (Organisation internationale de normalisation). (2015b) *Sécurité des machines – Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité – Partie 1 : Principes généraux de conception*, ISO 13849-1. Genève : ISO.

ISO (Organisation internationale de normalisation). (2012) *Robots et composants robotiques – Vocabulaire*, ISO/FDIS 8373. Genève : ISO.

ISO (Organisation internationale de normalisation). (2011a) *Robots et dispositifs robotiques – Exigences de sécurité pour les robots industriels – Partie 1 : Robots*, ISO 10218-1. Genève : ISO.

ISO (Organisation internationale de normalisation). (2011b) *Robots et dispositifs robotiques – Exigences de sécurité pour les robots industriels – Partie 2 : Systèmes robots et intégration*, ISO 10218-2. Genève : ISO.

Jocelyn, S. (2012) *Identification et réduction du risque pour les interventions de maintenance et de production sur des presses à injection de plastique en entreprises*, Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, Montréal, Québec, Canada.

Kondo, Y., Takemura, K., Takamatsu, J. et Ogasawara, T. (2010) *Smooth Human-Robot Interaction by Interruptible Gesture Planning*, Communication présentée à IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Montréal, Québec, Canada, p. 213-218.

Kubota, M. et Fujikawa, T. (2012) *Empirical Approach to Assessing Foot Injury Level Resulting from being Run Over by a Mobile Robot*, Communication présentée au Safety of Industrial Automated Systems (SIAS), Montréal, Québec, Canada, p. 228-233.

Malm, T. *et al.* (2010) « Safety of Interactive Robotics – Learning from Accidents », *International Journal of Social Robotics*, 2(3), 221-227.

Marsot, J, Fadier, E. et Daille-Lefèvre, B. (2014) *Méthodologie d'aide à la rédaction d'un cahier des charges basée sur l'usage*, Communication présentée à IMdR, Lambda Mu, 19^e Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement, Dijon, France, p. 1-8.

Matthias, B et al. (2011) Safety of collaborative industrial robots – Certification possibilities for a collaborative assembly robot concept, Communication présentée à IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing, ISAM 2011, Tampere, Finlande, p. 1-6.

Moller, A., Roalter L. et Kranz, M. (2011) *Cognitive Objects for human-computer interaction and human-robot interaction*, Communication présentée au 6th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), Lausanne, Suisse, p. 207-208.

Montreuil, V. (2009) *Interaction Décisionnelle homme-robot : la planification de tâches au service de la sociabilité du robot*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Toulouse, France. Tiré de http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/40/10/50/PDF/montreuil_lathese-1.pdf

Mraz, S. (2016) Interview: Paving the way to an IoT world. *Machine Design*. Tiré de <http://machinedesign.com/iot/interview-paving-way-iot-world>

Mumm J. et Mutlu, B. (2011) *Human-robot proxemics: physical and psychological distancing in human-robot interaction*, Communication présentée au 6th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot, Lausanne, Suisse, p. 331-338.

Murashov, V., Hearl, F. et Howard, J. (2016) « Working safely with robot workers: Recommendations for the new workplace », *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13 (3), D61-D71.

Parisot, F. (2014) « Nous ouvrons la voie de la collaboration entre robots et opérateurs », affirme Bernard Carera, directeur général de Stäubli Robotics. *Usine nouvelle*. Tiré de <http://www.usinenouvelle.com/article/nous-ouvrons-la-voie-de-la-collaboration-entre-robots-et-operateurs-affirme-bernard-carera-directeur-general-de-staubli-robotics.N266438>

Pietre-Cambacedes, L. et al. (2015) *Cybersécurité des installations industrielles – Défendre ses systèmes numériques*, France : Cépaduès.

Rozo, L., Calinon, S., Caldwell, D.G., Jiménez, P. et Torras, C. (2016) « Learning Physical Collaborative Robot Behaviors From Human Demonstrations », *IEEE Transactions on robotics*, PP (99), p. 1-15.

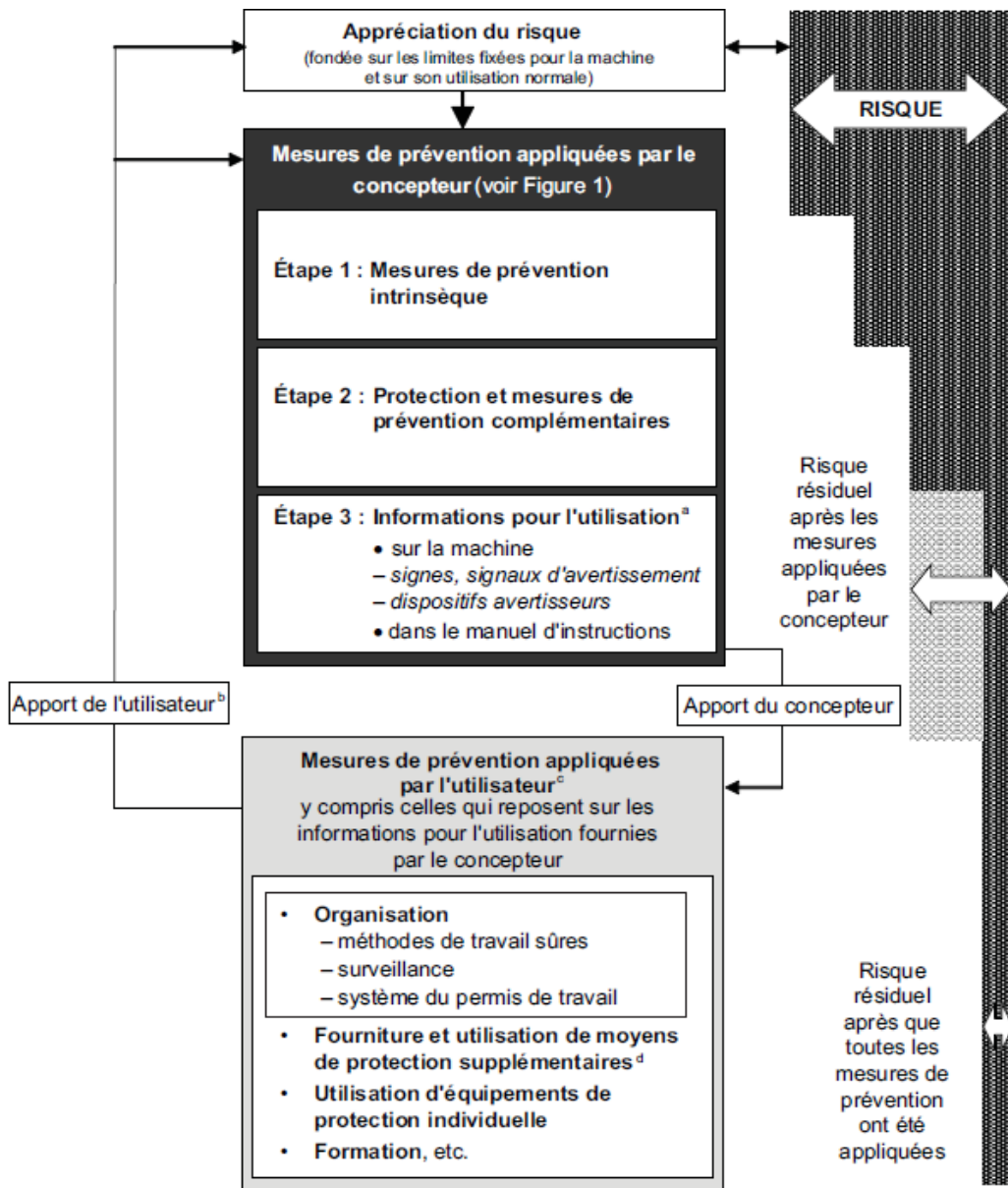
Schubert, J. (2015) *Challenges and new ways for the risk assessment of Cyber physical systems*, Communication présentée au Safety of Industrial Automated Systems (SIAS), Königswinter, Allemagne, p. 24-26.

Shin, D., Sardellitti, I., Park, Y.-L., Khatib, O. et Cutkosky, M. (2010) « Design and control of a bio-inspired human-friendly robot », *The International Journal of Robotics Research*, 29(5), 571-584.

Sidobre, D. et al. (2012) Human-Robot Interaction. Dans B. Siciliano (éditeur) : *Advanced Bimanual Manipulation - Results from the DEXMART Project* (vol. 80, p. 123-172). Napoli, Italie : Springer.

Winkler, A. et Suchý, J. (2011) « Vision Based Collision Avoidance of Industrial Robots », Communication présentée au 18th IFAC World Congress, Milan, Italie, p. 9452-9457.

ANNEXE A : PROCESSUS DE REDUCTION DU RISQUE



^a La fourniture d'informations adéquates pour l'utilisation fait partie de la contribution du concepteur à la réduction du risque, mais les mesures de prévention correspondantes ne prennent effet que lorsqu'elles sont appliquées par l'utilisateur.

^b L'apport de l'utilisateur est constitué par l'information qui est donnée au concepteur, soit par la communauté des utilisateurs en ce qui concerne l'utilisation normale de la machine en général, soit par un utilisateur particulier.

^c Il n'existe aucune hiérarchie entre les diverses mesures de prévention appliquées par l'utilisateur. Ces mesures de prévention ne font pas partie du domaine d'application de la présente Norme internationale.

^d Il s'agit des mesures de prévention rendues nécessaires par un ou des procédés de fabrication qui ne sont pas envisagés dans le cadre de l'utilisation normale de la machine ou par des conditions spécifiques d'installation qui échappent au concepteur.

Figure 13 Réduction du risque du point de vue du concepteur (ISO 12100:2010)¹.

¹ L'autorisation d'utiliser des extraits de la norme ISO 12100:2010 a été accordée par le Conseil canadien des normes (CCN). Aucune autre reproduction n'est permise sans l'autorisation écrite préalable du CCN.

ANNEXE B : EXEMPLE DE TABLEAU D'ANALYSE DE L'IDENTIFICATION ET DES SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES, PAR FONCTION DE SÉCURITÉ

Tableau 20 Identification de la fonction « Arrêt de protection »

<p>Action de sécurité : le robot cesse tout mouvement et l'exécution du programme se met en pause</p> <p>Éléments dangereux : le robot et son outil</p> <p>Déclencheur de l'action de sécurité : détection par un dispositif de protection (tapis sensible, barrage immatériel, etc.) conforme à la norme <i>ISO 13849-1:2015</i> et qui ne réduit pas la catégorie 3 ni le PL d de la fonction d'arrêt de protection.</p> <p>Condition de validité de la FS : valide durant tout le mode de fonctionnement</p>

Tableau 21 Spécifications de la fonction « Arrêt de protection »

Conditions d'activation de la FS	<p>Activable pour tout mode de fonctionnement</p> <p>Non activable lors d'une fonction d'arrêt d'urgence activée</p>
Interface de la FS	<p>Entrées : les bornes d'alimentation du dispositif de protection. Le dispositif de protection doit être ajouté à la cellule robotique collaborative.</p> <p>Traitement : carte électronique dédiée à la sécurité</p> <p>Sortie(s) : moteurs et freins des articulations</p>
Description de la FS	<p>Arrêt contrôlé du robot + contrôle (surveillance) de sa position d'arrêt + robot laissé sous tension.</p> <p>L'exécution du programme se met en pause.</p> <p>Une fois que le dispositif de protection cesse de détecter une présence, le robot redémarre automatiquement (si aucun bouton de réinitialisation) ou manuellement en actionnant le bouton de réinitialisation.</p>
Priorité par rapport à d'autres fonctions simultanées	<p>Priorité sur fonctions standards et autres fonctions de sécurité, sauf arrêt d'urgence et sauf arrêt de catégorie 0, car si anomalie sur signal d'entrée ou de sortie de l'arrêt de protection (bouton ou système), arrêt de catégorie 0 déclenché.</p>
Interaction avec d'autres FS	<p>Fonction d'assistance : Contrôle de l'arrêt de protection</p>
Autres FS agissant sur le même élément dangereux	<p>Toutes les FS implémentées sur le robot</p>

Temps de réaction maximal de la FS	524 ms
Fréquence de fonctionnement de la FS	Chaque cycle à peu fréquent
Conditions de redémarrage	Détection d'un signal de réinitialisation : - automatique (reprise automatique) ou; - manuelle par un bouton de réinitialisation.
Critères de performance	PL d (ISO 13849-1:2006) N.B. À condition que les composants ajoutés pour réaliser cette fonction de sécurité permettent de préserver ce PL conformément au tableau 11 de la norme ISO 13849-1:2015.
Spécificités logicielles + Réglage	E/S associées, à configurer par l'interface utilisateur. Quand une articulation est au repos après le déclenchement de l'arrêt de protection, sa vitesse doit rester inférieure à un certain seuil, en rad/s. L'articulation est contrôlée pour éviter un écart déterminé (en rad) par rapport à la position qu'elle occupait au moment où la vitesse a été mesurée en dessous du seuil susmentionné. Toute violation détectée par rapport à ces critères déclenche un arrêt de catégorie 0.
Autres spécifications	Catégorie d'arrêt 2
Éléments pouvant générer des erreurs-points de vigilance	S.O.

S.O. : sans objet

ANNEXE C : CHRONOGRAMMES DE PRINCIPE CONCERNANT CHAQUE CATÉGORIE (TYPE) D'ARRÊT

Les figures 14 à 16 expliquent graphiquement les définitions des catégories d'arrêt 0, 1 et 2 mentionnées dans le glossaire de ce rapport. Les trois graphiques proviennent du guide de Baudoin et Bello (2015) traitant de la conception de presses à servomoteur. Tout comme pour ces presses, la vitesse des moteurs des articulations d'un robot se comporte de la même manière selon qu'un arrêt de catégorie 0, 1 ou 2 est commandé.

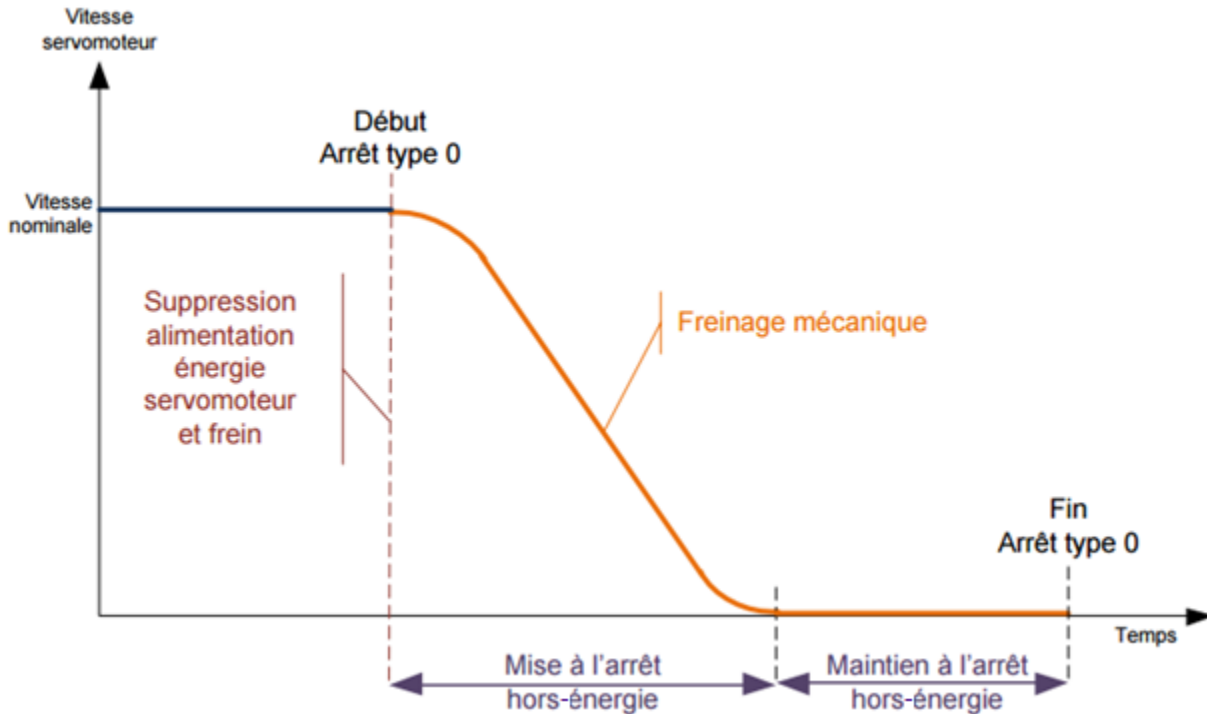


Figure 14 Explication visuelle d'un arrêt de catégorie 0, tirée de Baudoin et Bello (2015).

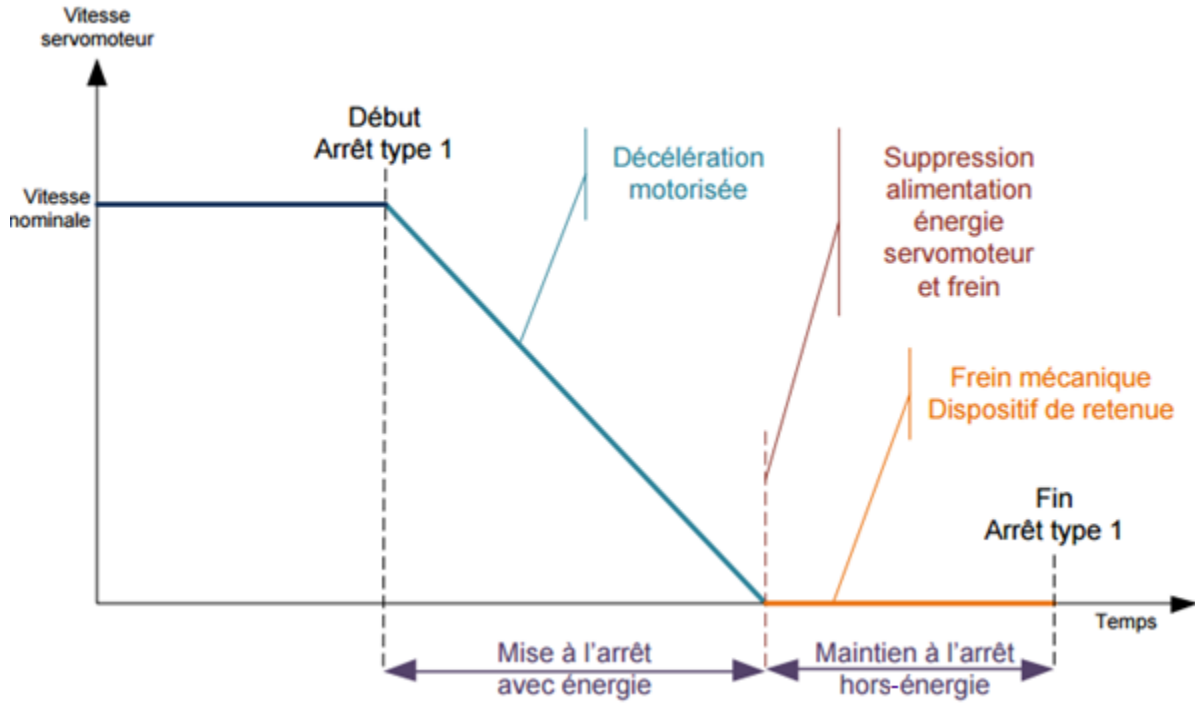


Figure 15 Explication visuelle d'un arrêt de catégorie 1, tirée de Baudoin et Bello (2015).

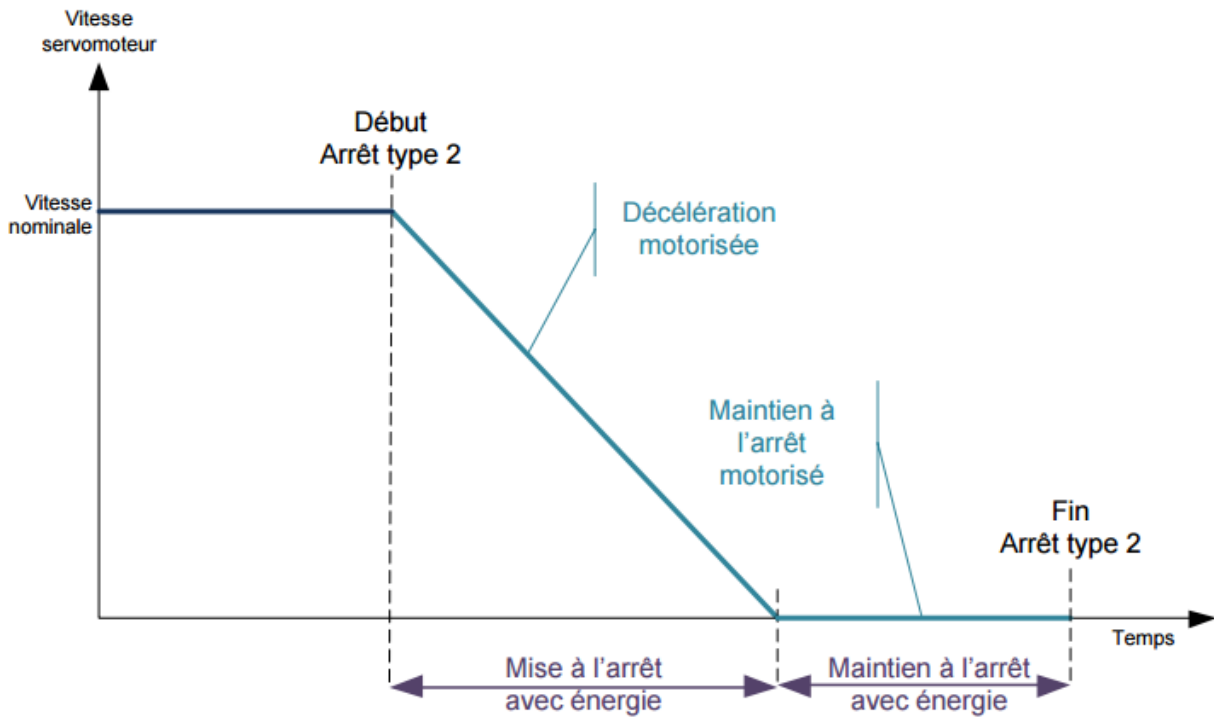


Figure 16 Explication visuelle d'un arrêt de catégorie 2, tirée de Baudoin et Bello (2015).

ANNEXE D : GRILLE « DONNEUR D'OUVRAGE »

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Donneur d'ouvrage » de collecte d'information

Rempli par : _____

Le : _____

1. Identification du donneur d'ouvrage :

Prénom	Nom	Titre / Fonction	Coordonnées
Entreprise (nom, adresse)			
Usine/lieu où le cobot est installé			
Lieu de l'entretien			

2. Processus À ROBOTISER (décrire le processus avant l'installation cobotique) :

Lien entre la tâche du travailleur et les produits ou processus :

Tâches des travailleurs :

- 1) _____
- 2) _____
- 3) _____

Produits, processus :

- 1) _____
- 2) _____
- 3) _____

3. Processus robotisé qui était PRÉVU au départ (avant intégration définitive) :

Décrire le processus. Le schématiser au besoin.

Tâches du robot

Tâches prévues d'être effectuées par le travailleur pendant les tâches du robot

<p><i>Tâches du robot</i></p>	<p><i>Tâches prévues d'être effectuées par le travailleur pendant les tâches du robot</i></p>
-------------------------------	---

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Donneur d'ouvrage » de collecte d'information

Rempli par : _____

Le : _____

4. Processus robotisé **RÉELLEMENT** mis en place (si ≠ du précédent) :

Décrire le processus. Le schématiser au besoin.

Tâches du robot

Tâches *réelles* effectuées par le travailleur pendant les tâches du robot

Comment expliquez-vous ces différences entre les processus prescrit et réel notamment concernant les spécifications liées à la sécurité ?

5. Besoin de robotiser (Facteurs ayant poussé l'entreprise à installer un cobot.)

Cochez les facteurs concernant l'entreprise et annotez sur les lignes, au besoin.

Facteurs économiques

- Amélioration de la productivité

- Besoin d'être plus compétitif

- Réduction des coûts de main-d'œuvre liés au produit

- Flexibilité de la gestion de production (ex. : les robots peuvent s'adapter à des tâches différentes)

- Amélioration de la qualité (ex. : répétabilité des tâches, traçabilité de la production, donc suivi de la qualité)

- Faible coût de robotisation et retour sur investissement (< 2 ans en moyenne)

Facteurs humains

- Amélioration des conditions de travail et sécurité (ex. : réduire les TMS, la charge de travail)

- Réaffectation des travailleurs à un nouveau poste (ex. : poste plus valorisant)

- Mises à pied

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Donneur d'ouvrage » de collecte d'information

Rempli par : _____

Le : _____

Facteurs environnementaux

- Besoin de limiter l'encombrement et autres contraintes d'espace (robotique classique inadaptée)
- Amélioration du bilan environnemental du processus (ex. : moins de rejet dans l'air comparé au processus de fabrication initial)

Autres bénéfices escomptés

- Mise en valeur de l'entreprise (ex. : un robot symbolise la capacité d'adaptation de l'entreprise, faire bonne impression auprès des clients, leur inspirer confiance davantage)

6. Élaboration du cahier des charges

Personnes consultées pour élaborer le cahier des charges :

Travailleur qui est censé cohabiter avec le cobot

A-t-il été consulté ? (Oui / Non) % d'implication ? (Faible / Moyen / Élevé)

Si oui, quand ? À quelle fin ? _____

Intégrateur

A-t-il été consulté ? (Oui / Non) % d'implication ? (Faible / Moyen / Élevé)

Si oui, quand ? À quelle fin ? _____

Contenu du cahier des charges soumis à l'intégrateur :

- But du projet
- Description de l'application ou procédé à réaliser
- Critères de choix du robot (en fonction du prix, de l'envergure, conditions inhérentes au travailleur en raison de sa physiologie ou de sa charge de travail ?)
- Volume de production, temps de cycle, caractéristiques (poids, dimension, matière, aspect, etc.)
- Nombre de pièces à traiter
- Opérations périphériques en amont et en aval, machines impliquées dans le procédé
- Environnement dans lequel le robot doit évoluer (température, humidité, etc.)
- Liste des documents fournis à l'intégrateur : références des pièces traitées et documents associés
- Calendrier et délai de réalisation
- Autres (précisez) : _____

Une appréciation du risque a-t-elle été prévue ? (Oui / Non)

A-t-elle été réalisée ? (Oui / Non)

Si oui, cette appréciation concerne :

Formellement / Informellement ?

- l'installation robotique classique ?
- l'installation cobotique ?

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Donneur d'ouvrage » de collecte d'information

Rempli par : _____

Le : _____

Expliquez les **spécifications liées à la sécurité** mentionnées dans le **cahier des charges** :

Spécification choisie	Raisons du choix

7. Phase de recherche et de validation des solutions

(robot et autres équipements ou composants)

Décrivez le processus de recherche de solutions.

- *Choix du robot et des moyens de protection, par qui ?*

- *Tests de différents robots et moyens de protection, par qui ?*

- *Démonstrations, avec une aide extérieure ou non ?*

- *Autres aspects ?*

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Donneur d'ouvrage » de collecte d'information

Rempli par : _____

Le : _____

Décrivez le processus de validation des solutions.

À quels moments êtes-vous intervenus dans la recherche et la validation des solutions (coopération donneur d'ouvrage – intégrateur). Expliquez.

8. Formation du personnel

Type de personnel :	<input type="checkbox"/> Production	<input type="checkbox"/> Maintenance	<input type="checkbox"/> Réglage
Formé par qui ? *			
*Normalement, le formateur devrait être l'intégrateur pour permettre une prise en main rapide de l'installation par le personnel et assurer la réussite du projet			

9. Bilan et retour d'expérience

Objectifs atteints concernant :	Prévision et réalité : Divergence ? Expliquez.
<input type="checkbox"/> Facteurs économiques ?	
<input type="checkbox"/> Facteurs humains (aspect « sécurité » avant tout) ?	

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Donneur d'ouvrage » de collecte d'information

Rempli par : _____

Le : _____

<input type="checkbox"/> Facteurs environnementaux ?	
<input type="checkbox"/> Autres bénéfiques escomptés ?	

Choix favorisant le travail collaboratif :

+	Expliquez.

Choix entravant le travail collaboratif :

-	Expliquez.

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Donneur d'ouvrage » de collecte d'information

Rempli par : _____

Le : _____

Difficultés vécues lors du processus d'intégration du cobot (de la conception à l'installation) ? Échanges faciles ou difficiles avec les divers intervenants (fournisseur, intégrateur, travailleurs, etc.)? Expliquez.

Cahier des charges

Que feriez-vous autrement si vous aviez à revivre une expérience d'intégration de cobot ? Expliquez.

10. Liste des documents collectés :

- Cahier des charges
- Autres (précisez) : _____

Source : *Robotisation - Mode d'emploi – Réussir son projet de robotisation*, Techniques de l'Ingénieur, ISBN : 978-2-85059-127-3

ANNEXE E : GRILLE « INTÉGRATEUR »

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Intégrateur » de collecte d'information

Rempli par : _____

Le : _____

1. Identification de l'intégrateur :

Prénom	Nom	Titre / Fonction	Coordonnées
Employeur (nom, adresse)			
Usine où le cobot est installé			
Lieu de l'entrevue			

2. Le robot

Marque : _____ Modèle : _____

« Cobot » d'origine ?

Robot conventionnel transformé en cobot à partir de :

Une carte de sécurité ?

Un module de sécurité ?

Nombre d'axes : _____ Charge utile : _____ Poids du robot : _____ Portée : _____

Plage de vitesses

→ **Articulations** : _____

→ **Point central de l'outil** : _____

Accès et commande à distance ? Précisez : _____

Autres spécifications techniques particulières :

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Intégrateur » de collecte d'information

Rempli par : _____

Le : _____

5. Moyens de protection utilisés par mode de collaboration adopté

Mode de collaboration	Moyens de protection associés (ex. FS, protecteurs, etc.)	Est-ce un moyen d'origine ?	Est-ce un moyen rajouté ?	Rajouté, pourquoi? Rajouté, comment ?
1. Arrêt nominal de sécurité contrôlé				
2. Guidage manuel				
3. Contrôle de la vitesse et de la distance de séparation				
4. Limitation de la puissance et de la force par conception ou par commande				

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Intégrateur » de collecte d'information

Rempli par : _____

Le : _____

6. Démarche d'intégration - De la réception du cahier des charges à l'installation du cobot :

Demander à l'intégrateur de décrire sa démarche. La noter. La compléter avec une ou plusieurs des questions suivantes, s'il ne les aborde pas.

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Intégrateur » de collecte d'information

Rempli par : _____

Le : _____

Au besoin : Questions pour aider l'intégrateur à décrire la démarche d'intégration

- 1) **Normes utilisées** (*ISO 12100:2010, ISO10218-1:2011, ISO 10218-2:2011, etc.*) ?
- 2) **Appréciation du risque par tâche** (ex. : apprentissage, production, etc.) ? **Comment ?**
- 3) **Identification des risques SST :**
 Tests effectués ? Lesquels ?
 Pour quelle(s) tâche(s) ?
 Quels risques SST trouvés ?
- 4) **PL ou SIL requis** estimé pour chaque FS ? **Comment ?**
- 5) **Modes de collaboration : motifs** de choix ?
- 6) **Moyens de protection requis : méthode** de leur choix ?
- 7) **Moyens de protection** choisis selon le temps de réaction des FS ?
- 8) Choix des **valeurs limites** (vitesse, force, etc.) : **démarche ?**
- 9) **Gestion des valeurs des paramètres** configurés : **mot de passe ou autre option ?**
- 10) **Conception** du système **validée ?**
- 11) **Installation** du système **validée ?**
- 12) **Mode d'emploi rédigé ?**
- 13) **Mode d'emploi** fourni au donneur d'ouvrage ?
- 14) **Documentation** technique **à jour ?**
- 15) **Tous les documents** techniques regroupés **en un même lieu ?**
- 16) **Personnel** de l'entreprise **formé par l'intégrateur** pour une prise en main rapide ?
- 17) **Bilan effectué** sur les points technique, économique et humain, **après quelques mois d'exploitation** de la cellule robotisée ?

7. Prise en compte du cahier des charges

7.1 Exigences de production...		
...demandées par le donneur d'ouvrage et pourquoi ?	...réellement intégrées au cobot ou rajoutées par l'intégrateur et pourquoi ?	Exigences prises en compte de quelle manière ?

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Intégrateur » de collecte d'information

Rempli par : _____

Le : _____

--	--	--

7.2 Exigences de *sécurité*...

...demandées par le donneur d'ouvrage et pourquoi ?	...réellement intégrées au cobot ou rajoutées par l'intégrateur et pourquoi ?	Exigences prises en compte de quelle manière ?

7.3 Exigences *autres*...

...demandées par le donneur d'ouvrage et pourquoi ?	...réellement intégrées au cobot ou rajoutées par l'intégrateur et pourquoi ?	Exigences prises en compte de quelle manière ?

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Intégrateur » de collecte d'information

Rempli par : _____

Le : _____

8. Difficultés résolues et obstacles actuels ou envisagés, en lien avec la sécurité de l'interaction homme-robot ?

9. Documents collectés :

- Plans de l'installation
- Appréciation des risques
- Détermination du PL ou SIL requis par fonction de sécurité
- Autres (précisez) : _____

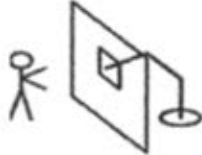
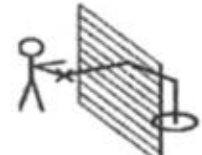

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Intégrateur » de collecte d'information

Rempli par : _____

Le : _____

ANNEXE - Exemples de cellule robotique collaborative

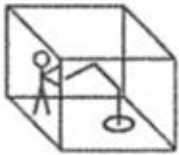
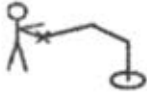
(Source : ISO 10218-2:2011, annexe E)

Type d'application		Description	Protections	Objectifs
	Fenêtre de passage de la main	<ul style="list-style-type: none"> — Fonctionnement automatique autonome dans l'espace contrôlé — Le robot se déplace dans la fenêtre — Pas d'interruption du fonctionnement automatique pendant l'accès 	<ul style="list-style-type: none"> — Protectors fixes ou sensibles autour de l'espace de travail — Vitesse réduite et espace de travail réduit près de la fenêtre — Aucun espace de travail du robot en dehors de la fenêtre — Si bord inférieur de la fenêtre à moins de 1 000 mm, moyens de protection conformes à 5.10.3 	<ul style="list-style-type: none"> — Chargement, déchargement — Contrôle, meulage à la main, nettoyage — Service
	Fenêtre d'interface	<ul style="list-style-type: none"> — Fonctionnement automatique autonome dans l'espace contrôlé — Le robot s'arrête à la fenêtre d'interface et peut alors être déplacé manuellement en dehors de l'interface 	<ul style="list-style-type: none"> — Protectors fixes ou sensibles autour de l'espace de travail — Vitesse réduite et espace de travail réduit près de la fenêtre — Commande à action maintenu pour le mouvement guidé 	<ul style="list-style-type: none"> — Empilage/déempilage automatique — Assemblage guidé — Remplissage/vidage guidé — Contrôle, meulage à la main, nettoyage — Service
	Espace de travail coopératif	<ul style="list-style-type: none"> — Fonctionnement automatique autonome dans un espace de travail commun (coopératif) — Le robot réduit la vitesse et/ou s'arrête quand une personne entre dans l'espace de travail commun (coopératif) 	<ul style="list-style-type: none"> — Système de détection de personne utilisant un ou plusieurs capteurs — Vitesse réduite en fonction de la distance (5.11.5.4) — Arrêt du robot sans risque quand l'espace interdit est accessible et redémarrage automatique possible après le dégagement si protection adéquate 	<ul style="list-style-type: none"> — Assemblage commun — Manutention commune — Contrôle, meulage à la main, nettoyage — Service

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Intégrateur » de collecte d'information

Rempli par : _____

Le : _____

Type d'application		Description	Protections	Objectifs
	Inspection	<ul style="list-style-type: none"> — Fonctionnement automatique autonome dans l'espace contrôlé — Une personne entre dans l'espace de travail coopératif tandis que le robot continue le fonctionnement à vitesse réduite et déplacements réduits 	<ul style="list-style-type: none"> — Protecteurs fixes ou sensibles autour de l'espace de travail — Système de détection de personne ou dispositif de validation — Vitesse réduite et espace de travail réduit après entrée dans l'espace de travail — Mesures contre le mauvais usage 	<ul style="list-style-type: none"> — Inspection et réglage des processus, par exemple application de soudage
	Robot guidé manuellement	<ul style="list-style-type: none"> — Espace de travail spécifique à l'application — Déplacement par guidage manuel — Guidage manuel le long d'une trajectoire 	<ul style="list-style-type: none"> — Vitesse réduite — Commande à action maintenue — Espace de travail coopératif dépendant des phénomènes dangereux de l'application 	<ul style="list-style-type: none"> — Assemblage manuel guidé, peinture, etc.

ANNEXE F : GRILLE « TRAVAILLEUR »

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Travailleur » de collecte d'information

Rempli par : _____

Le : _____

1. INFORMATIONS GÉNÉRALES

1.1 Identification des travailleurs

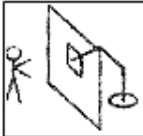
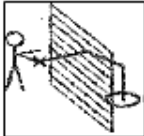

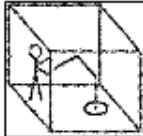
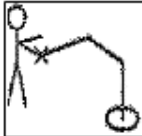
Prénom	Nom	Titre / fonction
Employeur (nom, adresse)		
Département/unité		

1.2 Robot

Marque	
Modèle	

1.3 Aménagement de la cellule robotique

(Cocher le schéma correspondant et dessiner l'aménagement de la cellule robotique au besoin)

Poste / Tâche à effectuer	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <input type="checkbox"/> </div> <div style="text-align: center;">  <input type="checkbox"/> </div> <div style="text-align: center;">  <input type="checkbox"/> </div> <div style="text-align: center;">  <input type="checkbox"/> </div> <div style="text-align: center;">  <input type="checkbox"/> </div> </div>
Aménagement de la cellule collaborative (Source : ISO 10218-2:2011, annexe E)	<div style="height: 300px; border: 1px solid black;"></div>

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Travailleur » de collecte d'information

2. FONCTIONNEMENT CONCRET DE LA CELLULE ROBOTIQUE**2.1. Cycle de travail**

<p>Description d'un cycle de production normal</p>	<p>a. État initial (robot, travailleur, produits/matière):</p> <ul style="list-style-type: none"> - - - <p>b. Phases de travail (rôle du robot, du travailleur ou autres) :</p> <p>#1 :</p> <p>#2 :</p> <p>#3 :</p> <p>#4 :</p> <p>#5 :</p> <p>#6 :</p> <p>c. État final (robot, travailleur, produits/matière) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - - - <p>Durée d'un cycle de travail :</p>
<p>Autres interventions en lien avec le robot :</p> <p>Pourquoi? Actions requises? Fréquence?</p>	<p>Arrêt :</p> <p>Démarrage, réarmement :</p> <p>Réglages :</p> <p>Maintenance :</p>

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Travailleur » de collecte d'information

2.2 Détails sur les phases de travail en production nécessitant des interactions avec le robot

Phase de travail (<u>prod.</u>)	Tâche Du robot	Tâche du travailleur	Type d'interaction	Risques	Divers (vitesse/trajectoire robot, position travailleur, etc.)
#					
#					
#					
#					

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Travailleur » de collecte d'information

2.3 Mesures de réduction du risque (MRR) en place pour le travailleur

MRR	Détails	Phases de travail
Vitesse, efforts réduits		#
Protection sur le robot		#
Protecteur fixe		#
Dispositifs de sécurité		#
Procédures		#
Formation théorique et pratique	(Contenu, durée, période d'apprentissage ou de compagnonnage, etc.)	#
EPI	<input type="checkbox"/> Gants; <input type="checkbox"/> Casque; <input type="checkbox"/> Lunettes; <input type="checkbox"/> Chaussure de sécurité <input type="checkbox"/> Autres :	#

Activité de recherche 2014-0046 – Grille « Travailleur » de collecte d'information

3. IMPACTS SUR LE TRAVAILLEUR

Impacts positifs	Impacts négatif
- Diminution de la charge physique, des risques de TMS <input type="checkbox"/>	- Collision avec le robot <input type="checkbox"/>
- Augmentation de la cadence <input type="checkbox"/>	- Appréhension, peur (déplacements difficilement prévisibles, vitesse, etc.) <input type="checkbox"/>
- Diminution des risques <input type="checkbox"/>	- Charge mentale (cadence, surveillance) <input type="checkbox"/>
- Interaction intuitive <input type="checkbox"/>	- Charge physique (cadence) <input type="checkbox"/>
- Autres (bons coups) : <input type="checkbox"/>	- Perte de marge de manœuvre, d'autonomie <input type="checkbox"/>
	- Apparition d'autres problématiques en lien avec les TMS <input type="checkbox"/>
	- Autres (difficultés) : <input type="checkbox"/>

4. INCIDENTS, REMARQUES DIVERSES

Événements	Causes	Possibilité d'amélioration