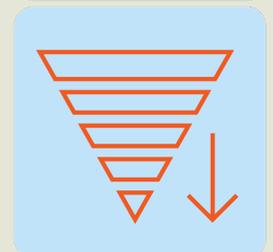


Identification en laboratoire des éléments essentiels au processus d'intégration sécuritaire de cellules cobotiques

Sabrina Jocelyn¹, Élise Ledoux², Damien
Burlet-Vienney¹, Isabelle Berger², Isvieysys Armas
Marrero², Chun Hong Law¹, Yuvin Chinniah³,
Abdallah Ben Mosbah³, Ilian Bonev⁴, Denys Denis²,
Laurent Giraud¹

R-1197-fr





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

Dans l'esprit de la *Loi sur la santé et la sécurité du travail* (LSST) et de la *Loi sur les accidents du travail et les maladies professionnelles* (LATMP), la mission de l'IRSST est de : Contribuer à la santé et à la sécurité des travailleuses et travailleurs par la recherche, l'expertise de ses laboratoires, ainsi que la diffusion et le transfert des connaissances, et ce, dans une perspective de prévention et de retour durables au 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, 2024
ISBN 978-2-89797-297-4 (PDF)

<https://doi.org/10.70010/QKWY4060>

© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé
et en sécurité du travail, 2024

IRSST – Service des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec) H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

Note au lectorat

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des autrices et auteurs. 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.

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

Cadre de référence pour la recherche en SST



Prévention des atteintes à l'intégrité physique et psychique



Réadaptation, retour et maintien au travail



Surveillance et prospection des données en SST



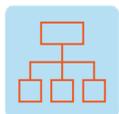
Identification des dangers, estimation et évaluation des risques



Élimination des dangers et maîtrise des risques



Métrologie appliquée à la SST



Organisation du travail



Santé mentale et psychologique



Population, société et SST

REMERCIEMENTS

Nous remercions la haute direction de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) d'avoir rendu disponible, en 2018 et en 2019, le budget spécial en immobilisation pour inaugurer et équiper le laboratoire de robotique de l'Institut. Ce budget a permis l'achat et la mise en œuvre des cellules cobotiques étudiées dans cette recherche. Nous remercions Claude Beaulieu, président de Sycodal, ainsi que son équipe, pour leur soutien de dans l'acquisition et l'installation d'équipements pour le laboratoire.

Nous remercions les deux entreprises québécoises qui ont reçu l'équipe de recherche afin de leur permettre d'observer des applications robotiques collaboratives en marche. Ces visites nous ont renseignés davantage sur les variables caractérisant les applications collaboratives, afin d'en déduire les éléments de variabilité à prioriser pour les cellules cobotiques à intégrer au laboratoire de l'IRSST.

Notre gratitude va également aux membres du comité consultatif du projet : Alain Brassard (Norda Stelo), Francis Bourbonnais (Robotech Automatisation), Marc Fallon (Advanced Motion & Controls), Patrick Tawagi (Vention) et Eric Lépine (Polytechnique, Collège Champlain). Enfin, merci au personnel d'ingénierie et d'ergonomie de l'Institut national de recherche en sécurité (INRS, France). Les interventions du comité consultatif aux étapes charnières de l'analyse des applications collaboratives dans les milieux de travail, ainsi que les conseils des collaborateurs de l'INRS (France) ont permis à l'équipe de recherche de valider et d'étoffer son analyse des applications collaboratives observées par vidéo ou en personne.

Notre grande appréciation va aux intégrateurs des cellules cobotiques du projet qui ont fait preuve de professionnalisme. Ils nous ont raisonnablement accommodés pour la mise en œuvre des cellules cobotiques, malgré les mesures sanitaires en vigueur pour contrer la pandémie de COVID-19. Ils se sont armés de patience, malgré les mesures sanitaires qui changeaient souvent le calendrier du projet.

Enfin, notre reconnaissance va aux collaboratrices externes qui ont transcrit plusieurs des entrevues audio et vidéo des intégrateurs, notamment : Christina Jocelyn (traductrice pigiste), Lucille Trudel (transcriptrice audio) de l'entreprise « En Majuscules » et Aida Haghighi (formation en génie industriel).

SOMMAIRE

Les cobots sont apparus vers 2010 en industrie et les accidents sont très peu documentés. La gestion des risques en cobotique représente un réel défi. La littérature scientifique montre l'existence de divers modèles, méthodes et outils pour gérer les risques en cobotique, en mettant l'opérateur humain au cœur de l'intégration des applications collaboratives. Cependant, un autre humain clé de la mise en œuvre de ces applications est négligé la plupart du temps. Il s'agit de l'intégrateur, celui qui doit concevoir la cellule cobotique. À notre connaissance, deux études portant sur un même projet de conception d'un logiciel aidant à mettre en œuvre des cellules cobotiques sont les seules mettant l'intégrateur au cœur de leur invention. Cependant, cette prise en compte de l'intégrateur se base sur un retour d'expérience relatif à leurs intégrations passées. Le présent rapport se démarque en plaçant l'intégrateur au cœur de sa méthodologie et en exploitant l'analyse de l'entièreté du processus d'intégration au fur et à mesure qu'il se déroule.

En effet, l'objectif de ce rapport est d'identifier, en laboratoire, les éléments essentiels au processus d'intégration sécuritaire de cellules cobotiques, en considérant les variabilités inhérentes à la tâche à cobotiser et à l'intégrateur. Pour y parvenir, l'étude passe par trois étapes principales : 1) la caractérisation des tâches cobotisées en industrie et des interactions humain-cobot à partir de matériels visuels issus d'études de cas et de visites en entreprise ; 2) l'intégration, en laboratoire, de quatre cellules cobotiques, à savoir deux tâches industrielles implantées chacune par deux intégrateurs (chaque intégrateur doit mettre en œuvre les cellules cobotiques relatives aux deux tâches industrielles) ; 3) l'analyse des éléments de prises de décisions des intégrateurs pour chacun des quatre processus d'intégration.

La caractérisation à l'étape 1 du projet permet de proposer cinq classes d'applications collaboratives : 1) la collaboration directe en alternance ; 2) la collaboration directe d'assistance ; 3) la collaboration indirecte séquentielle ; 4) la collaboration indirecte parallèle ; 5) le partage d'espace occasionnel sans collaboration. La définition de ces classes est utile à tout intégrateur voulant démarrer son analyse des risques d'une installation cobotique. L'analyse des risques commence avec la détermination des limites de l'installation à mettre en œuvre, au sens de la norme en robotique ISO 10218 et, plus généralement, au sens de la norme ISO 12100 en sécurité des machines. À la lumière des résultats des trois étapes de l'étude, ce rapport propose un outil de détermination des limites d'une installation cobotique. Ces limites sont les variabilités inhérentes à la tâche à cobotiser, notées au fil de la réalisation des intégrations et des différentes étapes de la méthodologie.

Nous avons constaté que, parmi tous les éléments de variabilité influençant les quatre processus d'intégration étudiés, les trois premiers éléments suivants liés à la tâche à cobotiser et les deux derniers éléments suivants associés à l'intégrateur étaient essentiels dans ces processus : 1) le choix du cobot ; 2) le type de pièce à manipuler et le type

d'outil robotique ; 3) les contraintes de temps de cycle et de productivité ; 4) la formation de l'intégrateur en sécurité des machines en général et en sécurité en cobotique plus précisément ; 5) les informations, relatives à la sécurité ou la productivité, qu'il reçoit de son entourage, puisqu'elles le poussent à remettre en question ses choix initiaux et les corriger s'il y a lieu (il s'agit de rétroactions). Des pistes de réflexion relatives à ces éléments de variabilité sont énoncées à la fin du rapport.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
Les cobots gagnent en importance dans l'industrie.....	2
Les risques pour la SST en cobotique.....	3
1. ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	5
1.1 Intégration, survol de la normalisation en sécurité et ses limites	5
1.2 Méthodes et outils pour l'intégration en cobotique	7
1.2.1 Pour la période avant 2019.....	7
1.2.2 Pour la période 2019-2023	9
1.3 Originalité de l'étude	12
2. OBJECTIFS ET LIMITES DE RECHERCHE	14
2.1 Objectif général.....	14
2.2 Objectifs spécifiques.....	14
2.3 Portée et limites de l'étude.....	14
3. MÉTHODOLOGIE : VUE D'ENSEMBLE.....	16
4. CARACTÉRISATION DES TÂCHES INDUSTRIELLES COBOTISÉES	18
4.1 Méthode pour la caractérisation	18
4.1.1 Répertoire des tâches industrielles cobotisées.....	18
4.1.2 Sélectionner deux tâches cobotisées	24
4.1.3 Choisir les cobots.....	25
4.2 Résultats de la caractérisation	26
4.2.1 La caractérisation des applications collaboratives	26
4.2.2 Les deux tâches cobotisées retenues.....	30
4.2.3 Le cahier des charges succinct.....	31
5. INTÉGRATION DE QUATRE CELLULES COBOTIQUES ET ANALYSE DES PROCESSUS ASSOCIÉS	36
5.1 Méthodes des deux intégrateurs	36
5.1.1 Méthodes des intégrateurs pour protéger l'opérateur	36
5.1.2 Méthodes des intégrateurs pour se protéger	38
5.2 Méthode d'analyse des éléments de prises de décisions des intégrateurs.....	39
5.3 Résultats pour la tâche A « Presse » avec l'intégrateur 1.....	41

5.3.1	Intégrateur 1 – Tâche A : application collaborative, appréciation et réduction du risque	41
5.3.2	Intégrateur 1 – Tâche A : analyse du processus d'intégration.....	49
5.4	Résultats pour la tâche A « Presse » avec l'intégrateur 2.....	58
5.4.1	Intégrateur 2 – Tâche A : application collaborative, appréciation et réduction du risque	58
5.4.2	Intégrateur 2 – Tâche A : analyse du processus d'intégration de l'application « Presse »	64
5.5	Résultats pour la tâche B « Moteur » avec l'intégrateur 1	72
5.5.1	Intégrateur 1 – Tâche B : application collaborative, appréciation et réduction du risque	72
5.5.2	Intégrateur 1 – Tâche B « Moteur » : analyse du processus d'intégration.....	74
5.6	Résultats pour la tâche B « Moteur » avec l'intégrateur 2.....	84
5.6.1	Intégrateur 2 – Tâche B « Moteur » : application collaborative, appréciation et réduction du risque	84
5.6.2	Intégrateur 2 – Tâche B « Moteur » : analyse du processus d'intégration.....	91
6.	DISCUSSION	99
6.1	Retour sur la méthodologie et les résultats	99
6.2	L'intégration d'une application collaborative : une tâche de conception.....	102
6.3	Appréciation du risque, réduction du risque et productivité dans l'activité de conception des intégrateurs	104
6.3.1	Appréciation du risque lors de l'intégration	104
6.3.2	Identification des risques et outils d'estimation du risque utilisés	107
6.3.3	Réduction du risque.....	109
6.4	Pistes de réflexion : des facteurs de variabilité comme outil contribuant à la prévention.....	111
	CONCLUSION.....	116
	BIBLIOGRAPHIE	120

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Catégories des lignes directrices et des recommandations listées dans Correia Simões <i>et al.</i> (2022) pour l'intégration sécuritaire de cobots.....	8
Tableau 2.	Les 10 vidéos d'application collaborative retenues sur les 27 consultées	20
Tableau 3.	Les 10 variables utilisées pour caractériser le type d'application collaborative avec leurs modalités	21
Tableau 4.	Analyse des 10 vidéos d'applications collaboratives et proposition d'une classification	27
Tableau 5.	Répartition des 27 vidéos consultées selon la famille et le type de tâches cobotisées.....	31
Tableau 6.	Résumé des spécificités techniques pour la tâche A « Presse »	32
Tableau 7.	Résumé des spécificités techniques pour la tâche B « Moteur »	34
Tableau 8.	Synthèse du travail d'analyse des risques et de réduction des risques remis par l'intégrateur 1 pour la « Presse »	44
Tableau 9.	Problématique de succion et évolution de la solution	56
Tableau 10.	Défis des plans de sécurité et évolution de la solution	58
Tableau 11.	Synthèse du travail d'analyse des risques et de réduction des risques remis par l'intégrateur 2 pour la « Presse »	62
Tableau 12.	Défi de l'analyse de risques et évolution de la solution	67
Tableau 13.	Défis relatifs au scrutateur laser et évolution de la solution	68
Tableau 14.	Synthèse du travail d'analyse des risques et de réduction des risques remis par l'intégrateur 1 pour la tâche « Moteur »	75
Tableau 15.	Défi de calculs liés au préhenseur et évolution de la solution.....	79
Tableau 16.	Exemples de défis liés au cobot et évolution de la solution	81
Tableau 17.	Synthèse du travail d'analyse des risques et de réduction des risques remis par l'intégrateur 2 pour la tâche « Moteur »	89
Tableau 18.	Souci d'éviter les collisions et évolution de la solution.....	92
Tableau 19.	Défis liés à la conception des doigts de la pince et évolution de la solution.....	98
Tableau 20.	Rappels au sujet de l'intégrateur 1	100
Tableau 21.	Rappels au sujet de l'intégrateur 2.....	101

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Vente mondiale des cobots et des robots conventionnels.....	2
Figure 2.	Vue d'ensemble de la méthodologie de recherche.....	16
Figure 3.	Processus adopté pour caractériser les tâches à cobotiser en laboratoire, à la lumière d'une caractérisation des tâches cobotisées en industrie.	18
Figure 4.	Répartition des cobots et des tâches selon l'intégrateur.....	26
Figure 5.	Éléments de variabilité retenus pour générer des scénarios de variabilités pour la tâche A « Presse ».....	33
Figure 6.	Les vis utilisées pour la tâche B « Moteur ».....	35
Figure 7.	Éléments de variabilité retenus pour générer des scénarios de variabilités pour la tâche B « Moteur ».....	35
Figure 8.	Flèche symbolisant l'emplacement de l'intégrateur 2 dans la zone de coincement entre le mur jaune et l'arrière de la presse simulée.....	39
Figure 9.	Positionnement de l'intégrateur 1 par rapport au cobot lors de la programmation de la tâche B « Moteur ».....	39
Figure 10.	Agencement de composantes dans la cellule cobotique de la tâche A « Presse » par l'intégrateur 1 (source : rapport de l'intégrateur 1).....	42
Figure 11.	Agencement des dispositifs de sécurité dans la cellule cobotique de la tâche A « Presse » par l'intégrateur 1 (source : rapport de l'intégrateur 1).....	43
Figure 12a.	Processus d'intégration de l'application « Presse » (Intégrateur 1).....	50
Figure 13.	Simulation sur <i>RoboDK</i> que l'intégrateur 2 a retenue pour la tâche A (source : rapport de l'intégrateur 2).....	59
Figure 14.	La presse simulée et son chariot pour la récupération de plaques d'acier (source : rapport de l'intégrateur 2).....	59
Figure 15.	Agencement des composantes de la cellule cobotique de la tâche A pour l'intégrateur 2 et zones protégées associées au scrutateur laser – zones non à l'échelle (source : rapport de l'intégrateur 2).....	60
Figure 16.	Agencement des composantes de la cellule cobotique de la tâche A pour l'intégrateur 2 et plans de sécurité virtuels programmés dans l'environnement « UR » (source : rapport de l'intégrateur 2).....	61
Figure 17a.	Processus d'intégration de l'application « Presse » (Intégrateur 2).....	65
Figure 18.	Profondeur des orifices de la matrice des vis noires conçue par l'intégrateur 1 (source : rapport de l'intégrateur 1).....	72

Figure 19.	Profondeur des orifices de la matrice des vis grises conçue par l'intégrateur 1 (source : rapport de l'intégrateur 1).	73
Figure 20.	Agencement des composantes dans la cellule cobotique de la tâche B par l'intégrateur 1 (source : rapport de l'intégrateur 1).....	73
Figure 21.	Processus d'intégration de l'application « Moteur » (Intégrateur 1).	77
Figure 22.	Simulation sur <i>RoboDK</i> que l'intégrateur 2 a retenue pour la tâche B (source : rapport de l'intégrateur 2).	84
Figure 23.	Agencement des composantes de la cellule cobotique de la tâche B pour l'intégrateur 2, délimitation du champ d'action du cobot et de l'opérateur (source : rapport de l'intégrateur 2).	85
Figure 24.	Plans de sécurité virtuels de la tâche B par l'intégrateur 2 (source : rapport de l'intégrateur 2).....	86
Figure 25.	Doigts dessinés et imprimés en 3D par l'intégrateur 2 pour saisir les vis noires et grises (source : rapport de l'intégrateur 2).	86
Figure 26.	Intégrateur 2 testant la cellule cobotique : il joue le rôle de l'opérateur récupérant la vis saisie par le cobot afin de l'insérer dans le moteur simulé (source : rapport de l'intégrateur 2).	87
Figure 27a.	Processus d'intégration de l'application « Moteur » (intégrateur 2).	93
Figure 28.	Facteurs de variabilité influençant le processus d'intégration (partie 1).....	113
Figure 29.	Facteurs de variabilité influençant le processus d'intégration (partie 2).....	114

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Acronyme	Définition
3D	Trois dimensions
ABB	<i>Asea Brown Boveri</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASSE	<i>American Society of Safety Engineers</i>
AU	Arrêt d'urgence
C	Cobot
CC	Courant continu
Cetim	Centre technique des industries mécaniques
cm	Centimètre
CNC	Machine à commande numérique
CNESST	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
Cobot	Voir la définition de ce mot dans le glossaire
COVID-19	Maladie à coronavirus identifiée en 2019
CR	Compte rendu
CSA	Association canadienne de normalisation (<i>Canadian Standards Association</i>)
DCS	<i>Dual Check Safety</i>
EPI	Équipement de protection individuelle
FAT	<i>Factory Acceptance Test</i>
FRQ	Fonds de recherche du Québec
GC	Gouvernement du Canada
H	Humain
H-C	Humain-cobot
HMI	Interface humain-machine (<i>Human Machine Interface</i>)
IFR	<i>International Federation of Robotics</i>
INRS	Institut national de recherche et de sécurité (France)
IP	Protocole internet (<i>Internet Protocol</i>)
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail

IRSST ■ Identification en laboratoire des éléments essentiels au processus d'intégration sécuritaire de cellules cobotiques

Acronyme	Définition
ISDE	Innovation, Sciences et Développement économique Canada
ISO	Organisation internationale de normalisation (<i>International Organization for Standardization</i>)
kg	kilogramme
KIM-MHO	<i>Key Indicator Method for Manual Handling Operations</i>
m	Mètre
min	Minute
mm	Millimètre
N	Newton
PCO	Point central d'outil
PL	Niveau de performance (<i>Performance Level</i>)
PLC	Automate programmable (<i>Programmable Logic controller</i>)
PLd	PL de niveau « d »
PL _r	Niveau de performance requis
po	Pouce
RLRQ	Recueil des lois et des règlements du Québec
RSI	<i>Revised Strain Index</i>
RSST	Règlement sur la santé et la sécurité du travail du Québec
RULA	<i>Rapid Upper Limb Assessment</i>
s	Seconde
SAT	<i>Site Acceptance Test</i>
SCRAM	<i>Scalable Risk Analysis & Estimation Method</i>
SST	Santé et sécurité du travail
TMS	Troubles musculosquelettiques
TR	Rapport technique (<i>technical report</i>)
TS	Spécification technique (<i>technical specification</i>)
UR	<i>Universal Robots</i>
V	Volt
WoS	<i>Web of Science</i>

AVANT-PROPOS

Il est fortement recommandé que le lecteur lise le glossaire avant le corps du rapport afin de se familiariser avec la terminologie et certains concepts en robotique et en sécurité des machines.

La pertinence du projet de recherche à l'origine de ce rapport a été reconnue dès 2017. L'autorisation du projet sur la base du protocole de recherche a été obtenue en 2019, en considérant les connaissances scientifiques de l'époque. Ainsi, l'originalité et l'utilité de l'étude démontrées au chapitre 1 se basent sur des publications datant du début de la réalisation du projet, c'est-à-dire en 2019. Par ailleurs, les processus d'intégration présentés se sont déroulés d'août 2020 à mars 2021. Ces précisions temporelles sont importantes afin de situer la réalisation du projet dans le temps dans un domaine où les écrits et les avancées technologiques évoluent rapidement.

Notez que le chapitre 6 « Discussion » se concentre essentiellement sur l'analyse des processus d'intégration et les connaissances que nous pouvons en tirer. Pour rester fidèles à l'objectif général de l'étude, nous avons évité autant que possible de comparer les intégrateurs, sauf quand cette comparaison concourt à cet objectif et à la compréhension de certains propos indiqués dans le rapport.

GLOSSAIRE

N.B. Les mots soulignés sont définis dans le glossaire.

Analyse des risques (analyse du risque) : En sécurité des machines, processus en trois étapes : 1) la détermination des limites de la machine ; 2) l'identification des phénomènes dangereux et des situations dangereuses associées ; 3) l'estimation des risques associés à ces situations dangereuses. Pour plus de détails sur ces termes, veuillez consulter le document suivant de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) : <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2932301> ou la norme ISO 12100 (Organisation internationale de normalisation [ISO], 2010a).

Application collaborative : Processus comprenant au moins une partie de la séquence du robot industriel où celui-ci, son outil robotique, la pièce manipulée ou travaillée, les équipements ou obstacles influençant les risques à l'utilisation et l'opérateur se trouvent dans le même espace protégé (ISO, 2023).

Appréciation des risques (appréciation du risque) : En sécurité des machines, processus itératif comprenant deux parties : l'analyse des risques et l'évaluation des risques. La première itération porte sur la machine dépourvue de ses mesures de réduction de risques. La seconde itération, sur la machine comprenant les mesures de réduction de risques choisis pour réduire les risques appréciés à la première itération. La ou les itérations subséquentes s'opèrent tant et aussi longtemps que les risques résiduels sont considérés comme inacceptables malgré les mesures mises en place pour réduire les risques.

Cellule cobotique : Ensemble constitué du cobot, de son outil robotique, de ses capteurs et des équipements auxiliaires contribuant à la tâche du cobot, ainsi que les moyens de protection installés.

Cobot (robot dit « collaboratif ») : Combinaison des mots « collaboration » et « robot ». C'est un robot industriel conçu pour partager un même espace avec l'humain, sous certaines conditions (p. ex. l'*UR10e* d'*Universal Robots* avec une charge utile de 12,5 kg). Seule une appréciation des risques peut confirmer si ce partage d'espace est acceptable, donc suffisamment sécuritaire pour l'humain. Selon l'ISO 10218-2 (ISO, 2023), un robot ne peut être qualifié de collaboratif. Seule l'application industrielle associée peut obtenir ce qualificatif si les risques pour l'humain sont acceptables. Cependant, pour faciliter la compréhension du lecteur déjà habitué au terme « cobot » et par souci d'allègement du texte, ce rapport utilise ce terme et ses dérivés.

Cobotique (ou robotique collaborative) : Branche de la robotique qui porte sur le partage de l'espace de travail entre un robot industriel et un humain. Quand le robot est un robot conventionnel, un module de sécurité externe (p. ex. : *FreeMove* de *Veo Robotics*, *SafeMove* d'ABB, ou *Dual Check Safety – DCS* de *Fanuc*) peut être branché à son contrôleur pour favoriser le partage d'espace, si une appréciation des risques permet de déterminer que ce partage d'espace est suffisamment sécuritaire. Quand le robot est

un cobot, ses propriétés intrinsèques de sécurité combinées ou non à des dispositifs de protection (ou autres mesures de réduction des risques) favorisent le partage d'espace, si une appréciation des risques permet d'arriver à cette conclusion.

Composante : Élément physique inclus dans la cellule cobotique (p. ex. : cobot, outil robotique, capteurs de pièces, table, équipement auxiliaire, etc.).

Élément de variabilité (ou facteur de variabilité ou variabilité) : Facteur représentant une spécificité technique de l'application collaborative et qui influence le processus décisionnel de l'intégrateur. Ne pas confondre « élément de variabilité » avec le mot « variable ».

Équipement auxiliaire : Toute machine située aux alentours du cobot dans la cellule cobotique.

Évaluation des risques (évaluation du risque) : Exercice qui, à l'issue de l'analyse des risques, consiste à porter un jugement sur l'acceptabilité des risques et des mesures de réduction de risques associés qui sont jugées nécessaires (ISO, 2010a).

Événement dangereux : « Événement susceptible de causer un dommage » (ISO, 2010a). Un démarrage inopiné du cobot est un exemple d'événement dangereux.

Facteur de variabilité (ou élément de variabilité ou variabilité) : Voir la définition de « élément de variabilité ». Ne pas confondre « facteur de variabilité » avec le mot « variable ».

Intégrateur : Personne qui conçoit ou participe à la conception de la cellule cobotique. Au Québec, si cette personne n'est pas un(e) ingénieur(e), sa conception doit être supervisée par un(e) ingénieur(e), comme l'exige la Loi sur les ingénieurs.

Intégration (ou mise en œuvre) : Action de combiner un robot avec un outil robotique et d'autres équipements ou une autre machine comprenant des systèmes robotiques supplémentaires pour former une application robotique capable d'effectuer un travail utile, tel que la production de pièces (ISO, 2023). L'intégration peut aussi inclure les exigences relatives à l'installation des machines et des équipements auxiliaires associés à l'application (ISO, 2023).

Mise en œuvre : Voir la définition du mot « intégration ».

Outil robotique : Dispositif installé au bout du bras du robot et lui permettant d'effectuer sa tâche. Cet outil peut être un préhenseur, un pistolet de pulvérisation, un dispositif de soudage, etc.

Phénomène dangereux : « Source potentielle de dommage » (ISO, 2010a). Le bras en mouvement du cobot ou la fermeture des doigts d'un préhenseur sont des exemples de phénomènes dangereux.

Préhenseur : Outil robotique servant à saisir ou à manipuler des pièces. Le préhenseur peut être une pince ou une ventouse par exemple.

Risque : En sécurité des machines, combinaison du dommage corporel et de la probabilité de ce dommage (ISO, 2010a). La probabilité du dommage dépend de trois paramètres : 1) la durée ou la fréquence d'exposition au phénomène dangereux ; 2) la probabilité d'occurrence de l'événement dangereux ; 3) la possibilité d'éviter ou de limiter le dommage.

Robot conventionnel : Robot industriel généralement séparé physiquement de l'humain, souvent par un protecteur avec dispositif(s) de verrouillage (p. ex. le *KR 1000 Titan* de *Kuka* ayant une charge utile de 1,3 t).

Robot industriel : Manipulateur automatique fixe ou mobile, à au moins trois axes reprogrammables, réalisant des tâches d'applications industrielles (ISO, 2011a). Les robots industriels sont regroupés en deux types : 1) les robots conventionnels ; 2) les robots dits « collaboratifs », aussi appelés « cobots ».

Robotique collaborative : Voir la définition de « cobotique ».

Situation dangereuse : « Situation dans laquelle une personne est exposée à au moins un phénomène dangereux » (ISO, 2010a)

Système robotique : Machine comprenant :

- le robot industriel ;
- le ou les outils robotiques ;
- tous les capteurs et dispositifs de l'outil robotique final (p. ex. : systèmes de vision, contrôleur de soudure) requis pour soutenir la tâche prévue ;
- le programme de la tâche robotisée (ISO, 2023).

Variabilité (ou élément de variabilité ou facteur de variabilité) : Voir la définition de « élément de variabilité ». Ne pas confondre « variabilité » avec le mot « variable ».

Variable : Donnée ou information utilisée pour caractériser les situations de collaboration humain-cobot. Cette caractérisation a permis de subdiviser les applications collaboratives étudiées en cinq classes. Ne pas confondre « variable » avec l'expression « élément de variabilité ».

INTRODUCTION

La cobotique appartient à la robotique de pointe ou robotique avancée (Rosen *et al.*, 2022). La robotique avancée est l'un des leviers de la grappe d'innovation mondiale « Fabrication de pointe » (Gouvernement du Canada [GC], 2020). Cette grappe fait partie des cinq grappes d'innovation mondiales, anciennement appelées « supergrappes », que le Canada a annoncées en 2018 (GC, 2021). Ce gouvernement les a approuvées pour stimuler l'innovation et la croissance dans des secteurs industriels précis et pour asseoir son leadership international. « Les initiatives financées [...] au sein de grandes initiatives telles que les supergrappes d'innovation contribuent à relever les grands défis de société du Québec, et bâtissent les infrastructures de demain sur des approches intersectorielles » (Fonds de recherche du Québec [FRQ], 2019). Innovation, Sciences et Développement économique Canada (ISDE) mesurera le succès des grappes tout au long de la décennie suivant cette approbation.

Pour favoriser ce succès, les enjeux associés à la cobotique doivent être étudiés et répondus adéquatement. L'un d'eux est la sécurité des travailleurs que l'intégrateur doit considérer durant son processus de mise en œuvre d'une cellule cobotique. La sécurité représente un défi pour la mise en œuvre de la cobotique, entre autres, en raison du manque de compréhension des normes de sécurité et des difficultés associées à l'appréciation des risques (p. ex. difficulté à statuer sur l'acceptabilité d'un seuil limite de vitesse sécuritaire du cobot¹ dans le cadre de son interaction avec l'humain) (Aaltonen et Salmi, 2019 ; Berx *et al.*, 2022 ; Jocelyn *et al.*, 2017). De plus, le fait que la sécurité en cobotique soit une problématique émergente, la connaissance des lésions professionnelles associées reste limitée, malgré la croissance des cobots sur le marché mondial. Cette limite complique un exercice d'anticipation des situations dangereuses lors de l'intégration d'une cellule cobotique (processus de gestion du risque inclus). Afin d'outiller correctement les intégrateurs, il est nécessaire de comprendre les facteurs qui influencent leur processus décisionnel durant leurs activités d'intégration. Ces facteurs éclaireront sur la réalité de leur travail. Ainsi, les recommandations du rapport et celles d'études à venir seront adaptées à cette réalité.

L'analyse ergonomique du travail est reconnue pour outiller les travailleurs afin de faciliter la réalisation de leurs tâches ou de résoudre des problématiques de sécurité associées. Par exemple, en fournissant des outils mieux adaptés aux exigences de la tâche et en s'appuyant sur les savoirs d'expérience pour bonifier les formations à la tâche. Inspiré par cette approche, ce rapport de recherche exploratoire présente la démarche d'une équipe interdisciplinaire « ingénierie-ergonomie ». Cette démarche consiste à décrire et à analyser le processus décisionnel de deux intégrateurs dans leurs mises en œuvre, en laboratoire, de deux cellules cobotiques chacun (chapitre 5). Cette analyse permet

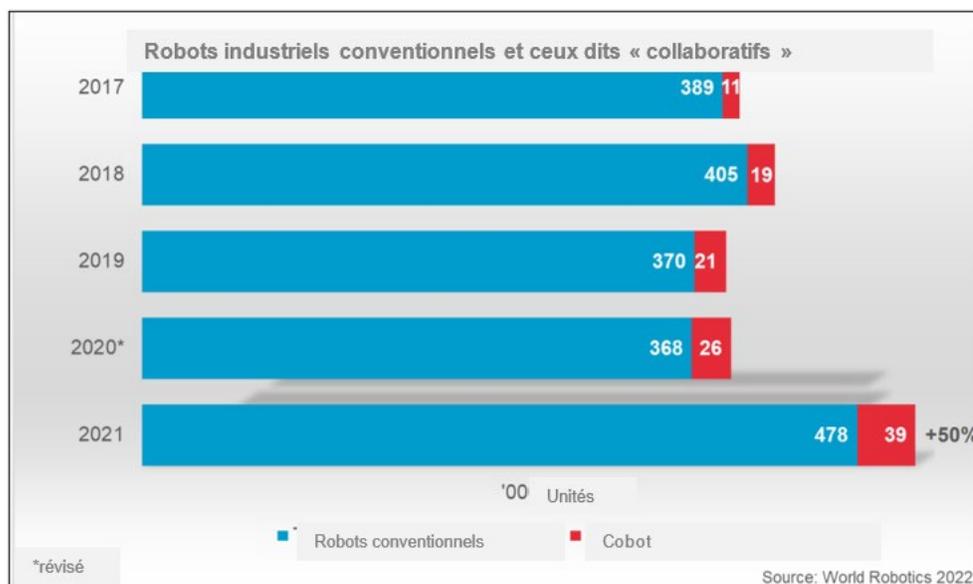
¹ Voir la définition dans le glossaire pour comprendre le choix d'utilisation de ce terme non scientifique et pour éviter toute confusion.

d'identifier les éléments essentiels au processus d'intégration sécuritaire, en considérant les variabilités inhérentes à la tâche à cobotiser et à l'intégrateur. Les réflexions (chapitre 6) émanant de cette identification permettront de guider le développement d'outils d'appréciation du risque puis de réduction du risque adaptés à la cobotique et ses intégrateurs. En raison de l'échantillon limité de processus (quatre cellules cobotiques intégrées), plutôt que d'émettre des recommandations généralisées, ce rapport émet des propositions préliminaires sur des éléments à considérer pour entreprendre une appréciation des risques lors de l'intégration d'une cellule cobotique.

Les cobots gagnent en importance dans l'industrie

En 2021, on comptait 3,48 millions de robots en service à travers le monde avec une augmentation annuelle moyenne de 14 %. Pour la seule année 2021, plus de 500 000 nouveaux robots ont été installés (International Federation of Robotics [IFR], 2022). Quant aux cobots, ils sont apparus vers 2010 dans l'industrie (Fryman *et al.*, 2012). Leurs ventes ont bondi de 50 % de 2020 à 2021 et leur part de marché croît globalement (figure 1). En 2021, Xiao (2021) anticipait que jusqu'en 2028, le taux de croissance annuel du marché mondial de la cobotique serait de l'ordre de 15 à 20 %. Cette firme constate qu'en peu de temps, les cobots sont passés du statut de produit « conceptuel » à celui de produit « stratégique ». Comme les lésions survenues en cobotique sont peu accessibles, alors que les cobots gagnent en importance dans l'industrie, il faut se pencher sur la gestion des risques associés.

Figure 1. Vente mondiale des cobots et des robots conventionnels.



Adapté de « World robotics 2022 », par International Federation of Robotics, 2022, p. 13. ©IFR, 2022.

Les risques pour la SST en cobotique

La problématique à l'origine de ce projet reste récente. Malgré l'effectif croissant des cobots en entreprise, les données sur les lésions et les passés-proches liés aux cobots sont limitées. Moulières-Seban (2017) mentionne un cas d'accident impliquant un cobot chez le Groupe Safran, sans donner de détails sur le contexte et les causes. En 2022, la pince d'un petit robot fracture le doigt d'un enfant lors d'une partie d'échecs (Henley, 2022). Sur la vidéo, on ignore s'il s'agissait d'un cobot ou d'un robot conventionnel dépourvu de barrière physique. Certains soupçonnent une erreur de programmation (Henley, 2022) ou une appréciation des risques lacunaire (Nelson Shea, 2022). Bien qu'il ne s'agisse pas d'une lésion professionnelle, un tel accident pourrait survenir en milieu de travail, avec un opérateur et un cobot manipulant des pièces dans un même espace restreint, comme dans le cas du jeu d'échecs.

En se basant sur l'analyse de 25 accidents graves survenus en Finlande et associés à des robots conventionnels, Malm *et al.* (2010) pensent que les accidents liés aux robots conventionnels sont transposables à la situation collaborative. Les lésions physiques attribuées aux robots conventionnels sont bien documentées (Charpentier et Sghaier, 2012 ; Lee *et al.*, 2021 ; Malm, 2010). On parle souvent de blessures ou de décès découlant d'un coincement ou d'un écrasement d'une partie corporelle entre un obstacle et le robot ou son outil robotique. En 2019, l'équipe Surveillance et veille statistique de l'IRSST a constaté le même genre de dommage en procédant à une analyse interne de 25 rapports d'interventions de la CNESST relatifs à des accidents survenus de 2008 à 2018, liés aux robots conventionnels. Ils représentaient 660 255,28 \$ en débours totaux, 339 093,57 \$ en indemnités de remplacement du revenu et 4 654,76 en jours indemnisés. Selon Malm *et al.* (2010), la proximité du travailleur en production par rapport au cobot augmentera le risque de lésion, notamment en diminuant la possibilité d'évitement du dommage. Ces auteurs concluent sur la nécessité de prévenir toute collision ou d'en minimiser l'effet si jamais l'impact se produit (d'où l'importance de choisir la vitesse adéquate du cobot lors de l'appréciation des risques). Si les mesures de réduction du risque adoptées sont inadéquates, les dommages en cobotique seront dus au cobot, à son outil robotique (p. ex. : pince, ventouse), à la pièce manipulée ou travaillée ou à l'environnement immédiat pourvu d'obstacles ou d'équipements auxiliaires.

Aussi, les limitations physiques du cobot peuvent contraindre les mouvements des opérateurs qui interagissent avec eux (p. ex. lors de l'assemblage d'une pièce en binôme cobot-humain). Par conséquent, les opérateurs sont amenés à adopter des postures contraignantes pouvant induire des troubles musculosquelettiques (TMS) (Atain Kouadio *et al.*, 2015). Par exemple, Atain Kouadio *et al.* (2015) relatent que des ébarbeurs ont éprouvé de la fatigue et des douleurs au poignet et à la main dominante, en collaborant avec la version « 6 axes » d'un cobot à guidage manuel. L'apparition de ces TMS à la suite d'un maintien prolongé de la gâchette de l'équipement de guidage manuel du cobot a poussé le fabricant à offrir plus de marges de manœuvre aux ébarbeurs en ajoutant un 7^e axe au cobot. Au-delà des risques physiques, des risques psychosociaux associés à la proximité ou au partage d'espace soutenu ou occasionnel avec le cobot sont également

relatés (Aldinhas Ferreira et Fletcher, 2022). Même si le cobot peut alléger la charge physique de l'opérateur, l'interaction humain-cobot peut générer plus de stress cognitif qu'un réglage manuel classique (Gervasi *et al.*, 2022). Certaines études montrent l'effet de la proximité du cobot ou de la cadence du procédé cobotisé sur la charge cognitive de l'opérateur (Koppenborg *et al.*, 2017). Par exemple, des mouvements du cobot à haute vitesse augmentent la charge de travail ainsi que l'anxiété de l'opérateur d'après des expériences effectuées auprès de sujets humains exposés à un cobot virtuel (Koppenborg *et al.*, 2017). En outre, une faible capacité de prédiction de la trajectoire du cobot par l'opérateur engendrait une baisse de leur performance.

Bien que les risques mécaniques prévalent de manière générale, les phénomènes dangereux associés aux robots industriels (cobots inclus) et aux systèmes robotiques peuvent être aussi d'origine électrique, thermique, ou liés aux bruits, aux vibrations, aux radiations, aux matériaux, à des substances, au non-respect des principes ergonomiques, à l'environnement du robot ou du système robotique, à une combinaison de phénomènes dangereux (annexe A de la norme ISO 10218-1 [Organisation internationale de normalisation [ISO], 2011a]). La norme liste les dommages possibles suivants, d'origine mécanique, pour le système robotique : écrasement, cisaillement, coupure, lacération, entraînement, coincement, perforation, friction, abrasion, injection ou éjection de fluide sous pression. Les autres phénomènes dangereux peuvent engendrer la cécité en cas d'exposition au laser, des brûlures liées à un risque thermique ou électrique, des difficultés respiratoires pouvant découler de chocs électriques, etc.

L'engouement récent pour des cobots soulevant des charges plus lourdes augmente le risque de lésions. Ces cobots comme l'*UR20* d'*Universal Robots* ou le *CR-35iA* de *Fanuc* sont plus puissants, avec des charges utiles respectives de 20 ou 35 kg et à plus longue portée que les premiers modèles de cobots comme l'*UR5e* (charge utile : 5 kg). L'utilisation croissante des cobots en entreprise contribuera également à augmenter la probabilité des dommages associés.

1. ÉTAT DES CONNAISSANCES

Cet état des connaissances comporte deux sections principales. La section 1.1 fait un survol de la normalisation traitant de cobotique. Elle est ponctuée de quelques remarques alimentées par des articles scientifiques dont l'équipe de recherche avait déjà connaissance. La section 1.2 constitue le cœur de l'état des connaissances scientifiques traitant de l'intégration des cobots ou de la gestion de l'espace de travail collaboratif en général, entre 1997 et 2023. La section 1.2 montre que les études consultées mettent en général l'accent sur l'opérateur partageant un même espace de travail avec le cobot. L'opérateur consiste en un acteur clé de la mise en œuvre de cellules cobotiques. Un autre acteur clé est l'intégrateur puisque ses choix peuvent impacter positivement ou négativement, via la conception de la cellule, les conditions (p. ex. physiques et temporelles) avec lesquelles l'opérateur compose. Or, les études consultées montrent que l'intégrateur n'est que rarement ciblé dans les études sur la mise en œuvre de cellules cobotiques. Rappelons que 2019 coïncide avec l'année d'approbation et de début du présent projet (cf. avant-propos). Ainsi, nous montrons que ce projet qui était pertinent à l'époque, l'est encore une fois bouclé maintenant.

Pour rester concise, la section 1.2 tire profit de la recension des écrits de Correia Simões *et al.* (2022) pour la période 1997-2019. Ensuite, cette section a été complétée avec 20 articles de revue et de conférence en anglais publiés de 2019 à janvier 2023, portant sur l'intégration de cellules cobotiques et la mise en œuvre d'applications collaboratives. En particulier, des articles traitant d'études centrées sur l'humain (l'opérateur ou l'intégrateur) ont été retenus. Ces articles excluent l'utilisation de cobots et de robots industriels conventionnels dans des milieux autres qu'industriels (p. ex. milieu chirurgical). Les articles retenus représentent des exemples plutôt que l'entièreté des centaines de résultats obtenus en questionnant la base de données *Compendex* sur le sujet. La taille du rapport devant être limitée, nous avons préféré laisser davantage de place à la méthodologie et aux résultats du projet plutôt qu'à l'état des connaissances.

1.1 Intégration, survol de la normalisation en sécurité et ses limites

En robotique (cobotique incluse), l'intégration est l'action de combiner un robot avec un outil robotique et d'autres équipements ou une autre machine comprenant des systèmes robotiques supplémentaires pour former une application robotique capable d'effectuer un travail utile, tel que la production de pièces (ISO, 2023). L'intégration peut aussi inclure les exigences relatives à l'installation des machines et des équipements auxiliaires associés à l'application (ISO, 2023).

Pour réduire le risque d'accident associé à la collaboration humain-cobot, la norme ISO 10218-2 (ISO, 2011b), prescrit des exigences de sécurité. Par exemple, pour sécuriser le fonctionnement collaboratif, elle prescrit quatre méthodes pouvant être exploitées seules ou en combinaison :

1. l'arrêt nominal de sécurité contrôlé : la détection du travailleur dans l'espace de travail collaboratif, grâce à un détecteur de présence, ordonne l'arrêt du cobot.

Celui-ci est arrêté, mais encore sous énergie, pour que l'opérateur puisse, par exemple, travailler ou manipuler une pièce maintenue par le cobot ;

2. le guidage manuel : les intentions de mouvement de l'opérateur sont transmises au système de commande du cobot via un équipement de guidage manuel manipulé par l'opérateur ;
3. le contrôle de la vitesse et de la distance de séparation : le cobot évite constamment l'opérateur en maintenant une vitesse et une distance de séparation déterminées, grâce à la détection de la position du travailleur par rapport à celle du cobot ;
4. la limitation de la puissance et de la force par conception ou par commande : l'énergie cinétique du cobot est limitée pour gérer le risque de blessure associé à un contact.

Le brouillon de la prochaine ISO 10218-2 (ISO, 2011b) resserre les critères admissibles pour sécuriser une application collaborative, en exigeant au moins l'utilisation de l'une des méthodes 2 à 4.

Pour favoriser l'implantation des quatre méthodes, la spécification technique ISO/TS 15066 (ISO, 2016) apporte des précisions à ce sujet, en plus de fournir des prescriptions pour l'appréciation du risque. Malgré tout, l'ISO/TS 15066 (ISO, 2016) reste peu claire sur les étapes ou les méthodes que les intégrateurs doivent suivre pour les tâches collaboratives (Chemweno *et al.*, 2020). Par exemple, il n'existe pas de prescriptions normatives spécifiques sur l'ergonomie dans les applications collaboratives (Bi *et al.*, 2021). À titre illustratif, l'ISO/TS 15066 (ISO, 2016) propose une démarche pour choisir le seuil de vitesse acceptable en fonction des parties corporelles risquant une collision avec un robot industriel (cobot inclus). Cependant, elle ne fournit aucune démarche pour définir ce seuil afin de contrer le stress ou la fatigue pouvant émaner de la collaboration humain-cobot. Or, l'ISO/TS 15066 (ISO, 2016) oblige à ce que les aspects ergonomiques et ceux liés à l'interface humain-machine soient considérés. Ainsi, une cadence appropriée du procédé (donc une vitesse adéquate) permettrait de minimiser ce stress ou cette fatigue. Puisque le cobot est appelé à interagir directement avec l'humain, les considérations ergonomiques demeurent importantes (Bi *et al.*, 2021).

Ce rapport de recherche ne vise pas à proposer de solutions liées aux considérations ergonomiques relatives aux opérateurs partageant un même espace de travail avec le cobot. Plusieurs des études citées en 2.2 (Bounouar *et al.*, 2020 ; Can Görür *et al.*, 2022 ; Colim *et al.*, 2021 ; Correia Simões *et al.*, 2022 ; Cunha *et al.*, 2021 ; Gualtieri *et al.*, 2019 ; Gualtieri, Fraboni, *et al.*, 2022 ; Gualtieri *et al.*, 2023 ; Realyvásquez-Vargas *et al.*, 2019), traitent d'aspects ergonomiques pour prévenir les risques menaçant la santé de l'opérateur. La présente étude se limite à noter et commenter les aspects ergonomiques qu'identifieront et considéreront les deux intégrateurs observés dans ce projet.

1.2 Méthodes et outils pour l'intégration en cobotique

1.2.1 Pour la période avant 2019

La littérature comporte de nombreux articles traitant de méthodes ou d'outils d'intégration en cobotique. Correia Simões *et al.* (2022) résume le portrait de cette littérature pour la période d'avant 2019. Ils présentent une analyse systématique de la littérature sur la conception d'espaces de travail où humains et robots collaborent dans un environnement industriel. Ils ont questionné les bases de données Scopus et Web of Science (WoS) avec les mots clés suivants : « *Robot/Cobot ; industry, task, allocation, criteria, design* » (c.-à-d., robot/cobot ; industrie, tâche, attribution, critères, conception). Ils ont retenu des articles en anglais uniquement et ont exclu ceux sous presse, les revues de littérature, les éditoriaux et les articles non définis. La consultation des deux bases de données a permis d'identifier dans un premier temps 282 articles. Après l'élimination des doublons et des articles dont le titre, le résumé puis le contenu déviaient de l'objectif ciblé, 65 articles de revues et de conférences ont été retenus et analysés en profondeur. Sur les 65 articles publiés de 1997 à 2019 inclusivement, six portaient sur la sécurité et le confort de l'humain.

Globalement, leur revue systématique détaillée de la littérature montre que près de 57 % des articles retenus (37) proposent des outils et techniques pour gérer l'espace de travail collaboratif, environ 38 % (25) donnent des lignes directrices, 3 % (2) proposent un mélange de concepts, d'outils et de techniques, tandis que 1,5 % (1) présentent des résultats conceptuels, toujours pour favoriser cette gestion. Dépendamment de l'article, un modèle conceptuel, une étude expérimentale, une étude de cas ou une étude par observations est à l'origine de la contribution scientifique. En utilisant une approche centrée sur l'humain pour concevoir des systèmes de travail, Correia Simões *et al.* (2022) listent un ensemble de lignes directrices et de recommandations tirées de leur revue de littérature (tableau 1). Ces lignes directrices et ces recommandations réfèrent aux dimensions physique, cognitive et sociale de l'activité de l'opérateur humain et aux aspects organisationnel, environnemental et autres des systèmes de fabrication.

Tableau 1. Catégories des lignes directrices et des recommandations listées dans Correia Simões *et al.* (2022) pour l'intégration sécuritaire de cobots

Catégorie	Sous-catégories	Exemple de lignes directrices ou de recommandations
Opérateur humain	Processus cognitifs et sociaux	Plus la probabilité d'erreurs du cobot augmente, plus la charge cognitive humaine croît.
	Confort et sécurité de l'humain	Planifier des trajectoires sécuritaires du cobot améliore la sécurité.
Technologie	Matériel	Pour des tâches complexes : surveiller les variations de la charge articulaire du cobot pendant la tâche collaborative et contrôler de manière adaptative le comportement d'assistance du cobot lorsqu'une surcharge est détectée.
	Logiciel	Utiliser un jumeau numérique et la réalité virtuelle pour comprendre la réaction humaine face à des mouvements normaux et inopinés du cobot.
Performance de l'équipe humain-robot	Espace de travail collaboratif et attribution de tâches	Pour améliorer la répartition des tâches, il faut : <ul style="list-style-type: none"> • se baser sur les différences entre les capacités des humains et les capacités technologiques des robots ; • faire porter la charge physique au robot au lieu de l'humain dès que possible ; • permettre la réaffectation dynamique des tâches entre l'opérateur et le robot, sur la base de leurs compétences et capacités respectives, en cas de retard inattendu dans la réalisation de ces tâches.
	Performance d'équipe et bien-être	Pour améliorer l'interaction collaborative, les facteurs influençant la réalisation des tâches, tels que : la fatigue, le niveau de compétence, etc. doivent être pris en compte.
	Stratégies d'interactions humain-cobot	Plutôt que d'exiger de l'humain de s'adapter à une interaction prédéfinie et immuable du cobot, programmer le cobot de sorte qu'il adapte sa stratégie d'interaction à celle de l'humain.
Approche intégrée pour concevoir la collaboration humain-cobot		Considérer des paramètres clés comme : la complexité technologique, la pertinence de la collaboration humain-cobot, l'indicateur coût-bénéfice, l'interface logistique, l'ergonomie et la sécurité pour identifier les études de cas les plus appropriées pour une exploitation rentable de la cobotique.

La riche liste des lignes directrices et des recommandations de Correia Simões *et al.* (2022) résume des contributions scientifiques permettant de concevoir des espaces de travail sécuritaires et durables centrés sur l'humain. Concevoir un espace de travail centré sur l'opérateur humain est l'une des clés du succès en cobotique. Sheridan (2016) insiste sur l'importance d'inclure l'analyse de la tâche dans le cadre de l'interaction entre l'opérateur humain et le robot. Cependant, qu'en est-il de l'intégrateur humain qui devrait appliquer ces lignes directrices et recommandations dans l'exercice de sa profession ? Ces contributions scientifiques sous forme de modèles ou d'outils devraient aussi être adaptées aux personnes chargées de les utiliser pour concevoir des cellules cobotiques efficaces et sécuritaires.

1.2.2 Pour la période 2019-2023

La littérature scientifique de 2019 à février 2023 compris, propose aussi des méthodes, des modèles et des outils informatiques pour l'intégration des cobots. Les études suivantes consultées ont le mérite d'être souvent anthropocentrées et axées sur l'activité de l'opérateur, ce qui favorise la capacité de ces méthodes, modèles et outils informatiques à répondre à ses besoins. Cependant, le caractère anthropocentrique de ces modèles, méthodes et outils informatiques ne se base toujours pas sur l'analyse de la tâche de l'intégrateur, voire de son activité, hormis Siebert-Evenstone *et al.* (2021) qui analyse le processus de réflexion de neuf participants experts dans le cadre d'un retour d'expérience sur leurs intégrations antérieures. Ainsi, la plupart de ces modèles, méthodes et outils informatiques ne sont pas centrés sur l'acteur central qu'est l'intégrateur.

Ces études portent souvent sur la cobotisation d'une ancienne tâche manuelle. Derrière ces études, il y a une volonté d'assister l'humain dans ses tâches en impliquant le cobot, plutôt qu'en éliminant l'opérateur. De plus, comme la cobotique prend tout son sens dans les interactions physiques entre l'opérateur et le cobot, nous observons que les études de cas récents se déroulent surtout dans les procédés d'assemblage. Aussi, le fait que l'assemblage collaboratif consiste en l'application collaborative la plus complexe et la plus intéressante en cobotique (Gualtieri *et al.*, 2019) pourrait expliquer cette prédominance des tâches d'assemblage dans les études consultées. Globalement, les articles consultés relatent des études de cas d'intégration en cobotique ou des études d'intégration à envergure plus importante.

À travers une étude de cas d'intégration de mise en œuvre d'un poste de travail en assemblage de boîtes avec le cobot YuMi d'ABB, Bejarano *et al.* (2019) montrent les avantages et difficultés associés à l'intégration d'un cobot. Certains des avantages soulevés et connus sont : la facilité de programmation que confère la fonctionnalité « programmation par apprentissage » du cobot, la capacité des cobots à réaliser des tâches autres que la fabrication afin d'améliorer l'expérience utilisateur. Voici deux défis correspondants qu'ils ont identifiés :

- les contrôleurs de cobots doivent être prêts à résoudre et à exécuter des trajectoires de manière efficace, tout en étant prêts à prendre en compte de nouveaux scénarios d'espace de travail où des humains font partie de l'environnement et le modifient ;
- les cobots doivent inclure des interfaces illustrant un comportement empathique capable de satisfaire et d'engager l'utilisateur humain.
- Ces défis rejoignent les recommandations en adaptation des stratégies d'interactions du cobot citées dans Correia Simões *et al.* (2022).

Realyvásquez-Vargas *et al.* (2019) présentent leur étude de cas de conception d'un poste d'assemblage initialement manuel et répétitif, source de TMS. Les auteurs ont utilisé le cobot UR3 d'*Universal Robots*. Cette étude a cherché à promouvoir l'utilisation de cobots dans l'industrie manufacturière à partir d'une approche ergonomique, c'est-à-dire comme

une stratégie de prévention des risques professionnels qui augmente à la fois la sécurité des employés et l'efficacité des processus de production. En matière d'ergonomie, ces auteurs recommandent de réaliser une évaluation ergonomique dans l'entreprise pour identifier les situations à haut risque de TMS. Ils suggèrent également de mettre en œuvre des technologies de fabrication de pointe pour prévenir ou minimiser la survenue de TMS. Pour améliorer la productivité, ils suggèrent d'étendre l'utilisation du cobot à d'autres tâches d'assemblages bien plus en demande que celles actuellement réalisées par le cobot.

Bounouar *et al.* (2020) présentent un cas d'intégration centré sur l'opérateur pour une tâche de recyclage, initialement manuelle et pénible pour lui. L'analyse de la tâche a été réalisée en laboratoire en observant et en interviewant des sujets humains. L'équipe multidisciplinaire réunissant des compétences en robotique, en ergonomie et en génie industriel a ensuite procédé à l'attribution d'opérations entre le cobot et l'opérateur (*task allocation*), puis à une étude de faisabilité. Subséquemment, un prototype du poste de travail a permis de tester la pertinence de la solution. Les auteurs arrivent à des conclusions similaires à celles de Jocelyn *et al.* (2017) : la constatation que l'opérateur change de tâche et devient le superviseur du recyclage effectué par le cobot ; l'importance d'impliquer l'opérateur en amont du processus pour favoriser l'adhésion de l'opérateur aux changements apportés dans son travail et exploiter le fait qu'il soit le mieux placé pour aider à reconcevoir le travail futur qui se fera en interaction avec le cobot. La méthode que Bounouar *et al.* (2020) a mise en place vise à aboutir à une solution bénéfique, sécuritaire et acceptable pour les utilisateurs finaux du poste de travail cobotisé : les opérateurs.

D'autres articles présentent des méthodes pour passer d'un poste de travail manuel à un poste cobotisé, afin de montrer comment une attribution adéquate des tâches permet de maximiser l'efficacité de la collaboration humain-cobot et les conditions de travail (Colim *et al.*, 2021 ; Cunha *et al.*, 2021 ; Gualtieri, Fraboni, *et al.*, 2022 ; Gualtieri *et al.*, 2023 ; Gualtieri *et al.*, 2019). Cette attribution découle souvent d'une approche anthropocentrée considérant des critères comme la sécurité, les caractéristiques et les capacités propres à l'opérateur. À titre d'exemple, le modèle de Gualtieri *et al.* (2019) permet de vérifier s'il est possible de repenser avec succès une tâche pour un contexte cobotique, avant de se lancer dans l'intégration. Cunha *et al.* (2021) décrivent la mise en œuvre d'un poste de travail que d'autres entreprises peuvent répliquer, en se basant sur des principes ergonomiques. La transformation numérique du poste d'assemblage, anciennement manuel, a montré une réduction des contraintes physiques qui altéraient l'ergonomie des travailleurs. Cette réduction oscillait entre 22 % et 38 % selon la méthode employée :

- RULA (*Rapid Upper Limb Assessment*) pour évaluer le risque de TMS associé au travail ;
- RSI (*Revised Strain Index*) pour déterminer la présence de troubles à l'épaule, au coude, à la main ou au poignet ;
- KIM-MHO (*Key Indicator Method for Manual Handling Operations*) pour évaluer des troubles au niveau de la partie distale du membre supérieur.

Cette transformation a également permis une hausse de 9 % de la productivité.

Kildal *et al.* (2022) présentent une étude de cas où l'opérateur et un cobot YuMi d'ABB concourent à la même tâche. Le partage synchronisé de leurs opérations facilite le travail dans un procédé de moulage par injection de métal. Les principales conclusions de cette étude portent sur l'amélioration de la performance du cobot en matière de saisie de pièces depuis un bac. Pour une performance impeccable, ils suggèrent d'équiper le cobot d'un préhenseur pourvu d'une meilleure adhérence pour éviter d'échapper les pièces. Toujours pour améliorer cette performance, ils suggèrent d'utiliser un algorithme capable de détecter les pièces à saisir, même dans un agencement ambigu de pièces.

En plus des exemples d'intégration des articles précédents qui consistent en des recommandations implicites, Gualtieri, Rauch *et al.* (2022) ont formulé des lignes directrices pour la conception d'un assemblage collaboratif humain-cobot sûr. Ils ont validé les résultats par une étude de cas en laboratoire et un jumeau numérique. Pour élaborer les lignes directrices, ils ont utilisé les documents normatifs suivants : ISO 12100 (ISO, 2010a), ISO 10218 partie 1 et partie 2 (ISO, 2011a ; ISO, 2011b), ISO/TS 15066 (ISO, 2016), ISO TR 20218-1 (ISO, 2018), des documents provenant des principaux fabricants de cobots, ainsi qu'une analyse documentaire détaillée d'articles évalués par des pairs. Ces derniers étaient tous liés à des mesures de réduction de risques. Voici quelques exemples de lignes directrices :

- prévenir les coincements dus aux parties des composantes du poste de travail ou des systèmes robotiques ;
- utiliser la détection pour anticiper les contacts avec les composantes du poste de travail ou avec les systèmes robotiques ;
- mettre en évidence les composantes et les obstacles dans l'espace de travail ;
- définir des trajectoires et des configurations de manière à ce que le corps humain ne soit pas facilement coincé entre les systèmes robotiques et les composantes du poste de travail ;
- limiter le cobot dans un volume défini pour éviter les coincements avec les systèmes robotiques et les postes de travail, limiter les vitesses, etc.

Andersson *et al.* (2020), Brun et Wioland (2020) ainsi que Rossato *et al.* (2021) présentent des retours d'expériences issus d'applications collaboratives fonctionnant en entreprise. Celui d'Andersson *et al.* (2020) se base sur des entrevues de gestionnaires et d'ingénieurs intégrateurs de cellules cobotiques. Les deux autres groupes d'auteurs ont plutôt interviewé des opérateurs. Ces études « terrain » rappellent le projet précédent de l'IRSST en cobotique : Jocelyn *et al.* (2017). Elles arrivent à des conclusions identiques : a) l'opérateur se sent valorisé en devenant le superviseur du cobot, b) les opérateurs jugent le cobot sécuritaire après une période de familiarisation et c) le processus d'intégration est un défi à ne pas sous-estimer. Le manque de compétences en programmation et le besoin de former du personnel conséquemment représentent un défi au début de l'intégration, malgré la programmation simplifiée des cobots ; de plus, le niveau de difficulté de programmation dépend du cobot.

Plusieurs articles proposent des modèles, méthodes ou outils informatiques permettant d'adapter la cellule cobotique à des modifications comme un changement de comportement humain ou de l'environnement de travail (Can Görür *et al.*, 2022 ; Gualtieri, Fraboni, *et al.*, 2022 ; Lavit Nicora *et al.*, 2021 ; Rega *et al.*, 2021 ;). L'adaptation s'effectue en temps réel ou non. Par exemple, Can Görür *et al.* (2022) proposent un mécanisme autonome de prise de décision en temps réel d'un cobot pour anticiper une panoplie de caractéristiques et de comportements humains, y compris les erreurs humaines. Ce mécanisme vise une collaboration personnalisée par rapport à l'opérateur.

Di Marino *et al.* (2022) proposent un outil logiciel pour l'optimisation de l'aménagement du poste de travail et pour une visualisation tridimensionnelle qui permet le prototypage virtuel de postes de travail collaboratifs humain-cobot. En utilisant des algorithmes ad hoc, les solutions optimisées sont conformes aux normes de référence en matière de sécurité et de dimensionnement de poste, selon les auteurs. Cet outil permet de visualiser rapidement l'effet de la modification de paramètres du poste de travail.

Une analyse des propos d'experts de conception d'espaces de travail collaboratif a alimenté un système informatique de formation et de programmation afin d'enseigner aux programmeurs novices à penser, à programmer et à déboguer comme un expert (Schoen *et al.*, 2022). Leur approche leur permettait d'aller plus en profondeur que Jocelyn *et al.* (2017). En effet, dans leurs entrevues d'intégrateurs, ils ont enquêté sur le comment des experts en mise en œuvre et en utilisation de cobots abordent l'adoption, l'intégration et le suivi de cobots dans un contexte de fabrication. Ce système informatique vise à combler le manque de compétences et d'expertises qu'expérimentent les milieux de travail en matière d'exploitation efficace de la cobotique. C'est le seul article parmi ceux consultés qui propose un système pensant comme un intégrateur expert. Sa genèse remonte à l'étude de Siebert-Evenstone *et al.* (2021). Les deux articles se basent sur leur méthode ethnographique mettant en évidence les relations existantes entre des éléments clés des réflexions des participants lors de leurs intégrations en cobotique et en robotique en général. Par exemple, dans les processus de réflexions de ces participants, ils ont constaté un lien fort entre l'application collaborative et : a) la sécurité ; b) l'opérateur ; c) la programmation du robot (cobot inclus). La faiblesse du lien de réflexion entre l'opérateur et la sécurité a étonné les auteurs. Ces deux études sont les seules qui se rapprochent le plus du rapport actuel.

1.3 Originalité de l'étude

Les études retenues à la section 1.2 ont le mérite de considérer l'interaction humain-cobot en mettant l'opérateur au cœur de l'intégration, notamment de l'analyse du risque, parfois à travers une analyse de la tâche à automatiser et de la tâche future du travailleur.

Les méthodes et outils présentés en 1.2 fixent leur objectif sur la fonctionnalité sécuritaire du système « robot-opérateur humain » ou « robot-humain partageant occasionnellement son espace de travail » (cobot inclus). À part Siebert-Evenstone *et al.* (2021) et Schoen *et al.* (2022), les concepteurs de ces méthodes et outils n'ont pas pris en compte l'utilisateur final réel des méthodes et outils proposés, c'est-à-dire, l'intégrateur. Ainsi, afin de

complémenter ces diverses contributions scientifiques orientées sur l'opérateur, ce projet met les projecteurs sur un autre humain clé du succès de la sécurité de la cellule cobotique : l'intégrateur.

Concernant, l'étude de Siebert-Evenstone *et al.* (2021), il est à noter qu'ils ont interviewé des experts *a posteriori* (c.-à-d., après l'accomplissement de leur intégration), tandis que l'étude associée à ce rapport suit deux intégrateurs en cours de processus, du début à la fin, ce qui permet de reconstituer le plus fidèlement possible les choix et les décisions prises dans le cadre de l'activité d'intégration tout en minimisant les biais de mémoire. De plus, notre étude se concentre sur les cobots contrairement aux deux articles précédents qui incluent également les robots conventionnels. L'objectif à long terme de Siebert-Evenstone *et al.* (2021) et Schoen *et al.* (2022) est la formation de novices basée sur les éléments de réflexions d'experts, tandis que celui à long terme de ce rapport est de proposer une méthode générique d'appréciation et de réduction du risque centrée sur le processus de mise en œuvre de l'intégrateur.

Consciente que cette étude est exploratoire, l'équipe de recherche se lance dans ce changement de paradigme en se penchant sur un échantillon de deux intégrateurs en automatisation, mais aux profils complètement différents. Chaque intégrateur met en œuvre deux cellules cobotiques. Les cellules cobotiques présentent des défis additionnels en relation avec l'interaction plus étroite et pouvant être en continu avec des travailleurs, ainsi qu'avec la perception de sécurité associée à ces équipements. Étudier les processus d'intégration permet d'identifier des éléments de variabilité pour soutenir l'appréciation du risque de cellules cobotiques. L'originalité du rapport réside également dans le fait que l'étude de ces mises en œuvre passe par : la compréhension, la documentation, le suivi et l'analyse de la prise de décision des deux intégrateurs.

2. OBJECTIFS ET LIMITES DE RECHERCHE

2.1 Objectif général

L'objectif général de l'étude est d'identifier, en laboratoire, les éléments essentiels au processus d'intégration sécuritaire de cellules cobotiques, en considérant les variabilités inhérentes à la tâche à cobotiser et à l'intégrateur.

2.2 Objectifs spécifiques

L'étude compte trois objectifs spécifiques :

1. Caractériser les tâches cobotisées en industrie et les interactions humain-cobot à partir de matériels visuels issus d'études de cas et de visites en entreprise ;
2. Faire intégrer, en laboratoire, quatre cellules cobotiques, à savoir deux tâches industrielles implantées par deux intégrateurs. Chaque intégrateur doit mettre en œuvre les cellules cobotiques relatives à ces deux tâches industrielles ;
3. Analyser les éléments de prises de décisions des intégrateurs pour chacun des quatre processus d'intégration.

2.3 Portée et limites de l'étude

Cette étude porte essentiellement sur les cobots. La spécificité du projet réside dans le fait qu'il s'intéresse à une partie de l'analyse du travail des intégrateurs en interactions avec les cobots pendant le processus d'intégration, tout en prenant en compte la référence au travail collaboratif effectif avec des opérateurs finaux à la suite d'observations de situations ou de cas en entreprise. Ce projet prend en compte l'opérateur au moment des observations mentionnées précédemment, uniquement à l'étape d'analyse de sa tâche. Cette recherche est une étude exploratoire représentant une première étape d'une série d'études visant à approfondir le travail collaboratif humain-cobot. Ainsi, cette recherche se concentre essentiellement à documenter le processus d'intégration en cobotique, du point de vue de l'activité de travail de l'intégrateur. Aucun opérateur spécifique ne sera associé aux applications collaboratives mises en œuvre par les intégrateurs étudiés. Ainsi, dans ce projet, certains outils propres à l'analyse ergonomique du travail (p. ex. des chroniques d'opérations) ont été utilisés pour décrire l'activité de l'intégrateur, et non celui de l'opérateur de la cellule cobotique.

Il est impossible de reproduire en laboratoire tous les déterminants d'une situation de travail réelle en entreprise (p. ex. contraintes techniques et organisationnelles). Cette étude permet donc une saisie partielle des interactions humain-cobot que l'on retrouverait en industrie. En revanche, une étude approfondie du travail des intégrateurs réalisée dans le cadre du présent projet permet une application en entreprise beaucoup mieux définie et orientée. À noter qu'un des deux intégrateurs réalisait régulièrement des contrats d'intégration en industrie au moment de l'étude et qu'il a amené cette dimension « industrielle » dans son approche.

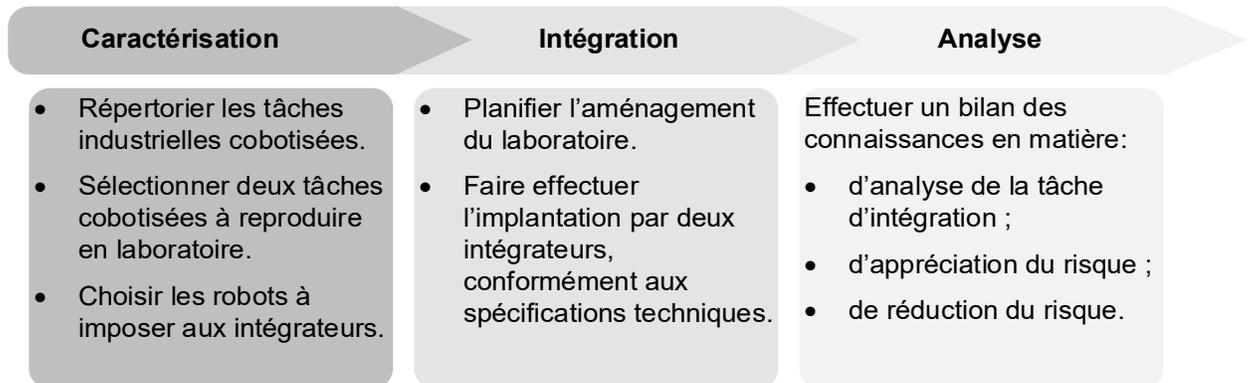
Dans un contexte où les intégrateurs de l'étude doivent soumettre à l'équipe de recherche des applications collaboratives sécuritaires et productives, à part la nécessité de suivre

les règles de l'art en vigueur pertinentes, aucun critère de sécurité ni d'ergonomie spécifique n'est exigé aux intégrateurs compte tenu du caractère exploratoire de l'étude. Ainsi, pour l'aspect d'ergonomie, nous abordons l'étude des processus d'intégrations davantage comme une occasion d'observer si des principes ergonomiques allaient être considérés et à quel point. De même, l'aspect de productivité a été abordé de manière qualitative au fil des observations des processus d'intégration.

3. MÉTHODOLOGIE : VUE D'ENSEMBLE

Cette étude se base sur une approche interdisciplinaire « ingénierie-ergonomie ». La figure 2 résume la méthodologie pour atteindre l'objectif général. La construction et la réalisation de la méthodologie ont nécessité une collaboration étroite entre les ingénieurs et les ergonomes de l'équipe de recherche. Cette collaboration a pris notamment la forme de réunions de discussions et de mise en commun des activités de recherche (p. ex. suivis hebdomadaires avec les intégrateurs).

Figure 2. Vue d'ensemble de la méthodologie de recherche.



Chacun des deux intégrateurs participant au projet a dû mettre en œuvre deux cellules cobotiques, avec une tâche cobotisée par cellule. La surface disponible pour accueillir les cellules cobotiques était de 5,5 m x 7 m. Cet espace était situé au laboratoire de robotique de l'IRSST (accès restreint). Le budget spécial disponible pour équiper le laboratoire en vue des intégrations a permis d'acquérir au préalable : trois cobots (modèles : *UR10e*, *Omron TM12*, *Sawyer*), six préhenseurs (un à ventouses et les autres à pince), des dispositifs de protection ou de sécurité (rideau optique, scrutateurs laser, peau sensible, boutons d'arrêt d'urgence, poignée de validation, tour lumineuse, etc.), un automate programmable dédié à la sécurité, des équipements auxiliaires (convoyeur, table, etc.), des caméras IP pour enregistrer les intégrateurs durant leur processus de mise en œuvre des cellules. L'achat du matériel devait être anticipé pour des questions budgétaires et logistiques afin de préparer la venue des intégrateurs. Une partie du budget a été réservée pour répondre aux besoins des intégrateurs lors de la conception des cellules, pour l'achat de matériel supplémentaire (p. ex. budget pour un panneau de commande, pour des structures métalliques permettant de simuler la présence d'équipements auxiliaires, comme une presse ou un moteur, dans l'espace de travail collaboratif). Bien qu'au moment de l'achat des cobots en 2018, des cobots à deux bras existaient sur le marché (p. ex. *YuMi* d'*ABB*, *Baxter* de *Rethink Robotics*), comme nous avons un budget pour trois cobots, nous avons opté d'abord pour un populaire dans l'industrie : l'*UR10e*. Ensuite, pour son concurrent l'*Omron TM12*, puis un dernier intrinsèquement plus sécuritaire : *Sawyer* que nous avons destiné initialement à l'initiation d'étudiants à la cobotique dans le laboratoire.

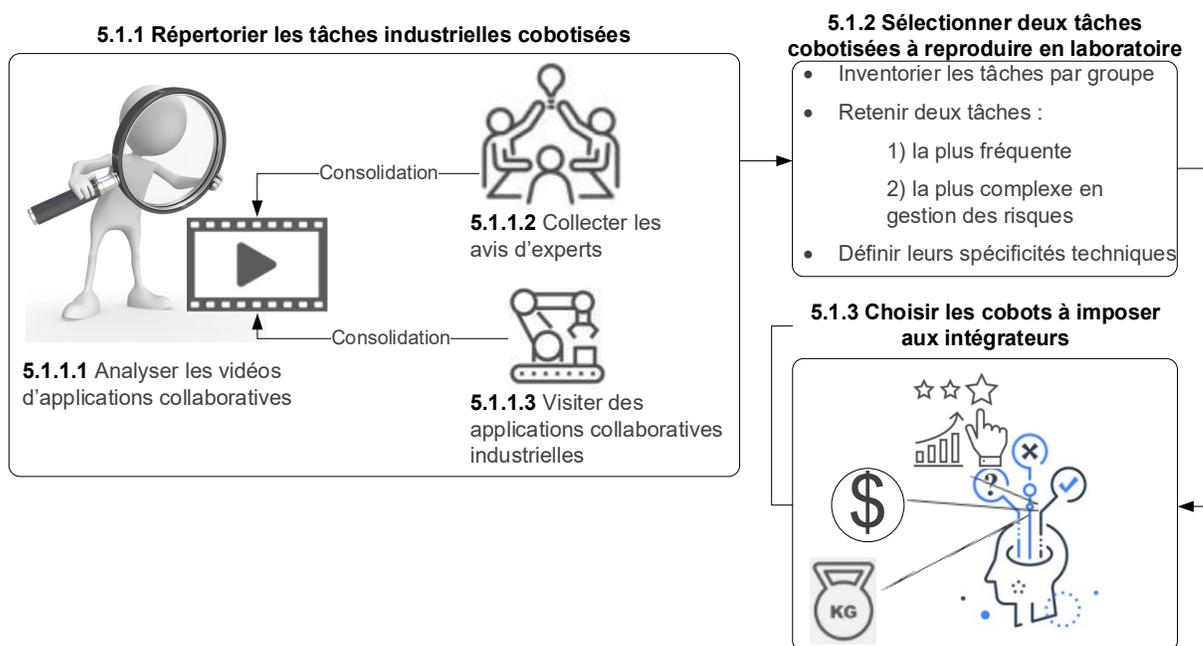
Pour chaque tâche cobotisée, l'intégrateur a choisi un cobot parmi deux des trois disponibles. Afin de sélectionner les deux tâches à reproduire au laboratoire de l'IRSST, l'étape « Caractérisation » s'est avérée nécessaire. Conséquemment, connaître les résultats de cette étape était nécessaire pour entreprendre les étapes « Intégration » et « Analyse » de la méthodologie. Ainsi, le chapitre 4 présente la méthodologie et les résultats associés à l'étape « Caractérisation ». Le chapitre 5 présente la méthodologie et les résultats associés aux étapes « Intégration » et « Analyse ».

4. CARACTÉRISATION DES TÂCHES INDUSTRIELLES COBOTISÉES

4.1 Méthode pour la caractérisation

La figure 3 synthétise le processus utilisé pour la caractérisation des tâches à cobotiser en laboratoire, en passant par une caractérisation des tâches cobotisées en industrie. Les flèches « Consolidation » signifient que les étapes 5.1.1.2 et 5.1.1.3 ont servi à confirmer les résultats trouvés en 5.1.1.1, tout en les enrichissant.

Figure 3. Processus adopté pour caractériser les tâches à cobotiser en laboratoire, à la lumière d'une caractérisation des tâches cobotisées en industrie.



4.1.1 Répertorier les tâches industrielles cobotisées

L'équipe de recherche a répertorié des tâches cobotisées en industrie en passant par une analyse de vidéos d'applications collaboratives, renforcée par une collecte d'avis d'experts et une visite d'installations cobotisées dans une usine. La littérature scientifique propose de nombreux articles qui catégorisent les tâches cobotisées. Leurs catégorisations réfèrent aux types d'interaction humain-robot (Bauer *et al.*, 2016 ; Cencen *et al.*, 2015 ; Gustavsson Christiernin, 2017 ; Hentout *et al.*, 2019 ; Kolbeinsson *et al.*, 2019 ; Krüger *et al.*, 2009 ; Matheson *et al.*, 2019 ; Michalos *et al.*, 2015 ; Moulières-Seban, 2017 ; Scholtz, 2002 ; Tihay, 2018 ; Thiemermann, 2005 cité par Quenehen *et al.*, 2022 ; Weichhart, 2018). Malgré tout, cette étude répertorie ces tâches, sous forme de classes d'applications collaboratives plutôt que de simples interactions humain-robot, car elle considère également les éléments avoisinants comme les équipements auxiliaires. En outre, elle vise, au cours de l'analyse de vidéos, de l'avis d'experts et de la visite

d'installation cobotisée, à identifier et faire ressortir plus de variables que les études susmentionnées caractérisant les tâches cobotisées. Identifier ces variables (cf. tableau 3) était nécessaire puisque leurs modalités ont permis de lister des éléments de variabilité (cf. figure 5 et figure 7 de la section 4.2.3) que les intégrateurs observés au chapitre 5 ont pu adopter afin de permettre à l'équipe de recherche de comprendre en quoi des éléments de variabilité impactent leurs processus décisionnels. Un peu plus tard, l'analyse des processus décisionnels des intégrateurs aura permis de confirmer et compléter cette liste d'éléments de variabilité (cf. section 6.4).

4.1.1.1 Analyse des vidéos

La recherche de vidéos a été effectuée en 2019 sur les sites Web de fabricants dont nous savions être concepteurs de cobots ou sur YouTube, en rentrant le nom du modèle d'un cobot connu à l'époque. Dans un premier temps, l'équipe de recherche a sélectionné 27 vidéos publiques présentant des applications variées de cobots industriels conçus d'origine pour collaborer avec l'humain : assemblage, emballage, palettisation, ensemencement de pétris, meulage, polissage, tâches d'inspection, macro et microsoudage, moulage par injection, etc. Les vidéos provenaient de concepteurs et de fabricants de cobots (p. ex. : *Universal Robots, ABB, Kuka, Omron, Rethink Robotics, RB3D, Gebo Cermex*), de distributeurs (p. ex. *HumaRobotics*), de centres techniques (p. ex. le Cetim) et d'organismes de recherche (p. ex. l'INRS France). Depuis 2019, le nombre de vidéos sur des applications cobotiques a considérablement augmentées afin de promouvoir ce type d'application (p. ex. <https://www.universal-robots.com/fr/%C3%A9tudes-de-cas/>).

Au final, dix vidéos permettant de visualiser des interactions humain-cobot ont été analysées par deux membres de l'équipe de recherche (tableau 2). Les autres vidéos n'ont pas été retenus puisqu'elles ne montraient aucune interaction, bien qu'elles laissaient supposer qu'une interaction soit possible, ou alors le cycle de production présenté n'était pas complet.

Tableau 2. Les 10 vidéos d'application collaborative retenues sur les 27 consultées

#	Application	Cobot ou fabricant
1	<u>Emballage & Palettisation</u>	UR
2	<u>Déchargement de machine</u>	Sawyer de Rethink Robotics
3	<u>Emballage</u>	UR
4	<u>Palettisation</u>	UR
5	<u>Palettisation</u>	Yaskawa
6	<u>Palettisation</u>	Sawyer de Rethink Robotics
7	<u>Ensemencement et striure</u>	YuMi d'ABB
8	<u>Assemblage</u>	UR
9	<u>Assemblage</u>	UR3 d'UR
10	<u>Meulage</u>	A7.15 de RB3D

L'analyse des vidéos a pris la forme d'une chronique d'opérations (St-Vincent *et al.*, 2011). Une chronique d'opérations permet de décrire spécifiquement l'ordre et le type d'opérations réalisées par le cobot et par l'humain pendant tout un cycle. Elle permet de visualiser concrètement l'interdépendance entre l'humain et le cobot, mais aussi avec les autres composantes (équipements auxiliaires) de l'application collaborative.

Par la suite, dix variables ont été utilisées pour caractériser le type d'application collaborative (tableau 3). Quatre variables, telles que la tâche, la pièce manipulée, le partage de l'espace et la synchronisation des opérations entre l'humain et le robot sont couramment utilisées dans la littérature scientifique (Bauer *et al.*, 2016 ; Michalos *et al.*, 2015 ; Moulières-Seban, 2017 ; Tihay, 2018). Six autres variables ont été ajoutées par les ergonomes de l'équipe afin de pouvoir décrire plus finement les interactions humain-cobot observables. Ces ajouts étaient nécessaires pour caractériser le type d'application collaborative dans une perspective plus anthropocentrée. Une validation interjuges avec 10 étudiants à la maîtrise en ergonomie a permis de confirmer la définition des modalités des variables retenues et la reproductibilité.

Tableau 3. Les 10 variables utilisées pour caractériser le type d'application collaborative avec leurs modalités

Variable	Modalité				
Tâche effectuée par l'humain et par le cobot	Même tâche	Tâche différente			
Séquence des opérations**	En alternance	Séquentielle	En parallèle	D'assistance	Opération ponctuelle de l'humain
Synchronisation des opérations	Oui	Non			
Synchronisation gestuelle de l'humain avec le cobot	Oui	Non			
Contrôle de la cadence de production	Contrôlé par le cobot	Contrôlé par l'humain	L'humain a sa propre cadence		
Interaction du début à la fin du cycle	Oui	Non			
Pièce manipulée par l'humain et par le cobot	Même pièce	Pièce différente			
Espace de travail	Espaces distincts	Espace partagé	Espace partagé ponctuellement		
Distance entre l'humain et le cobot	Proche	Séparée par un équipement auxiliaire	Éloignée		
Contact physique volontaire de l'humain avec le cobot	Oui	Non			

** La définition des cinq classes d'applications collaboratives, disponible en 4.2.1, permet de comprendre les modalités de la cellule « Séquence des opérations ».

De plus, l'analyse des vidéos a permis d'identifier des facteurs de variabilité à considérer lors de l'intégration d'une application collaborative se rapportant aux spécifications techniques du cobot (p. ex. : nombre de bras, nombre d'axes, portée, type d'outil robotique, etc.), aux caractéristiques de la tâche du cobot (rapidité, précision, force, nombre d'opérations) et aux caractéristiques des pièces manipulées (dimensions, forme, poids, texture). Dans la suite du texte, il ne faut pas confondre les facteurs de variabilité à

considérer lors de l'intégration et les variables utilisés pour caractériser le type d'application collaborative.

4.1.1.2 Collecte d'avis d'experts pour vérification

Connue comme un moyen d'étoffer les données rares, les connaissances insuffisantes ou incertaines (Knol et al., 2010), la collecte d'avis d'experts a été utilisée par le biais de deux entretiens de groupe. Chaque entretien de groupe consistait en une réunion de deux heures, ciblant des personnes d'horizons divers n'appartenant pas l'équipe de recherche. Le premier groupe était composé de huit chercheurs en santé et en sécurité du travail avec de l'expérience de recherche en robotique collaborative : six ingénieurs et deux ergonomes. Le deuxième groupe était un comité consultatif composé de deux ingénieurs-intégrateurs en robotique et deux distributeurs d'équipements robotiques.

La première collecte d'avis d'experts visait à :

- accumuler des cas autres que ceux que nous avons analysés dans les vidéos afin de voir s'il existe des types d'applications collaboratives que l'équipe a négligés ;
- apprendre à connaître :
 - les applications collaboratives les plus fréquentes en milieu de travail, selon le vécu des experts,
 - les applications collaboratives qui représentaient un défi particulier d'un point de vue technique ou par rapport à la sécurité des travailleurs (en raison des risques associés aux machines et aux équipements) ;
- réviser, si nécessaire, les facteurs de variabilité déduits de l'analyse des vidéos.

La deuxième collecte d'avis d'experts avait pour but de vérifier si les listes de facteurs de variabilité étaient adéquates.

Avant les réunions, l'équipe de recherche a envoyé aux experts la documentation résumant le résultat de l'analyse basée sur les vidéos d'applications collaboratives. Ce document comprenait :

- le diagramme des facteurs de variabilité observés ;
- des exemples de ces facteurs ;
- le tableau des variables utilisées pour caractériser les applications collaboratives (tableau 3) ;
- un exemple de l'analyse d'une des situations vidéo pour illustrer comment l'analyse a été effectuée.

L'équipe de recherche s'est appuyée sur la collecte d'avis d'experts principalement pour examiner les facteurs de variabilité déjà identifiés et en ajouter certains le cas échéant.

4.1.1.3 Visites industrielles pour des observations pratiques

Deux usines ont été visitées par deux à trois membres de l'équipe de recherche. Les visites furent possibles grâce au certificat d'éthique que la présidente du comité d'éthique de la recherche de l'IRSST a octroyé le 17 décembre 2019, pour ce projet numéroté

2017-0012. L'une des visites s'est déroulée dans l'industrie aéronautique et l'autre dans la fabrication de pièces complexes destinées à divers secteurs industriels. L'équipe de recherche n'a utilisé que les données de cette dernière pour des raisons de confidentialité et d'éthique de la recherche. Lors de cette visite, huit applications collaboratives identiques ont été observées. Pour chacune d'entre elles, un cobot *UR5* était associé à une machine à commande numérique (CNC) pour du *pick-and-place* de pièces usinées incluant une étape de lavage. Un cobot *UR5* monté sur une plate-forme mobile autonome a également été observé. Deux grilles d'entrevues ont permis de collecter les données. La première, dédiée à l'intégrateur qui a conçu l'application, a permis de le questionner sur :

- le cobot intégré ;
- l'application collaborative (par exemple, un espace de travail partagé) ;
- les caractéristiques de :
 - la tâche du cobot et celle des opérateurs ;
 - les pièces manipulées par chacun d'eux ;
- les modes de fonctionnement et d'arrêt pendant la phase de production ;
- les mesures de protection en fonction de la méthode collaborative utilisée, conformément à la spécification technique ISO/TS 15066 (ISO, 2016) ;
- les contraintes de production, de sécurité et techniques ou autres.

La seconde grille, dédiée aux opérateurs interagissant avec le cobot, comprenait deux parties. La première partie permettait d'aborder :

- certaines caractéristiques des opérateurs (p. ex. : expérience avec la cellule cobotique, parcours éducatif et professionnel, son implication dans le changement technologique de l'usine) ;
- le travail des opérateurs au sein de la cellule cobotique ;
- les risques menaçant la sécurité des opérateurs ;
- toute augmentation ou diminution de la charge de travail.

La deuxième partie était une grille d'observation de l'activité réalisée dans l'application collaborative. Les points à observer étaient les éléments mis en évidence dans le premier questionnaire. Cette partie de la grille servait de procédure de double vérification.

L'observation avait également pour but de noter la durée de chaque opération que le cobot et l'opérateur effectuaient. À partir de l'observation, les membres de l'équipe ont réalisé une « chronique d'opérations » pour cette visite comme ils l'ont fait pour l'analyse des vidéos.

D'une part, les visites industrielles et la collecte d'avis d'experts ont permis de compléter la liste des variables à prendre en compte pour caractériser les situations de collaboration humain-cobot. D'autre part, elles ont permis de valider les classes d'applications collaboratives identifiées à partir des vidéos et du travail au niveau des variables (cf. résultats à la section 4.2.1).

4.1.2 Sélectionner deux tâches cobotisées

Le protocole de recherche prévoyait de sélectionner deux tâches pour les intégrations en laboratoire :

- l'une des deux devait appartenir à l'une des classes d'applications collaboratives la plus répandue ;
- l'autre tâche devait se rattacher à une classe d'application collaborative où la sécurité du travailleur est complexe à gérer en raison d'une présence plus marquée des éléments de variabilité ou d'une proximité plus soutenue de l'humain avec le cobot.

L'hypothèse était que de se pencher sur un cas plus complexe apporterait une plus-value pour l'étude à l'égard des intégrateurs en cobotique. Nous avons déduit ces classes de l'analyse des vidéos listées au tableau 2 et déterminé deux tâches à cobotiser. Le comité consultatif impliqué à l'étape 5.1.1.2 précédente a confirmé le choix des deux tâches retenues par l'équipe de recherche.

Pour pouvoir définir les spécificités techniques de ces tâches dans l'optique d'un cahier des charges (cf. section 4.2.3) à l'intention des intégrateurs participant au projet, une consultation des membres de l'équipe de recherche a été effectuée. La consultation a consisté en un formulaire visant à retenir les éléments de variabilité prioritaires à retrouver, idéalement, dans les deux tâches à reproduire. Le formulaire était divisé en sept sections, chacune regroupant un ensemble d'éléments de variabilité dont des exemples sont donnés entre parenthèses ici :

1. spécifications techniques relatives à la tâche (p. ex. : charge nominale du cobot, vitesse) ;
2. mode de marche et d'arrêt du système robotique (p. ex. : manuel, automatique, arrêt en cas de violation de limites) ;
3. espace de travail collaboratif (p. ex. point de saisie ou de dépôt des pièces manutentionnées par le cobot) ;
4. tâches du cobot (p. ex. : nombre d'étapes devant être exécutées pour que la tâche soit accomplie, précision requise du cobot pour cette exécution) ;
5. pièce manipulée (p. ex. : texture, aspect contondant) ;
6. ambiances (p. ex. : l'humidité, compatibilité électromagnétique) ;
7. autres (les chercheurs ont soulevé, dans cette section, des éléments de variabilité non abordés dans les sections précédentes comme : le temps de cycle, l'expérience et la formation de l'opérateur).

Dans chaque section du formulaire, les chercheurs ont identifié les éléments de variabilité qu'ils jugeaient importants. Ensuite, à la fin de chaque section, ils ont indiqué les éléments prioritaires parmi les éléments importants choisis.

Dans un premier temps, nous avons retenu les éléments de variabilité importants que la majorité des chercheurs avaient choisis (le numéro de la section correspondante du formulaire est inscrit entre parenthèses), c'est-à-dire :

- (section 1) : le préhenseur en contact direct avec la pièce manipulée, l'orientation de la surface d'appui du socle portant le cobot, la distance de déplacement d'un socle mobile du cobot, la portée du cobot, sa charge nominale, ses vitesses de fonctionnement, son nombre de bras, la disponibilité ou non d'un système de vision intégré ou externe;
- (section 2) : le fonctionnement automatique du cobot, l'arrêt nominal de sécurité contrôlé du cobot, l'arrêt d'urgence du cobot;
- (section 3) : le partage de l'espace avec des humains et des équipements mobiles, la distance de séparation ou de sécurité humain-cobot, les dispositifs de protection (ex., scrutateur laser), le point de saisie ou de dépôt variable en fonction de la position changeante de la pièce;
- (section 4) : la précision et la rapidité de la tâche du cobot;
- (section 5) : la géométrie et le poids de la pièce manipulée;
- (section 6) : l'éclairage;
- (section 7) : le temps de cycle.

Ensuite, ces éléments de variabilité ont été soumis au comité consultatif afin qu'ils sélectionnent ceux qu'ils considéraient comme les plus importants, en milieu industriel. À la lumière des éléments retenus, l'équipe de recherche a pu préciser les deux tâches à reproduire. Les éléments prioritaires ont permis à l'équipe de recherche de proposer aux intégrateurs divers scénarios à reproduire (cf. section 4.2.3). Cela a conduit à l'élaboration des spécificités techniques par tâche dans un cahier des charges succinct (cf. section 4.2.3). Ce cahier des charges correspondait à une liste de critères à respecter plutôt qu'un document complet. Procéder ainsi permettait de reproduire la réalité du terrain où le cahier des charges pour une application collaborative est souvent une liste sommaire de spécifications à satisfaire (Jocelyn *et al.*, 2017).

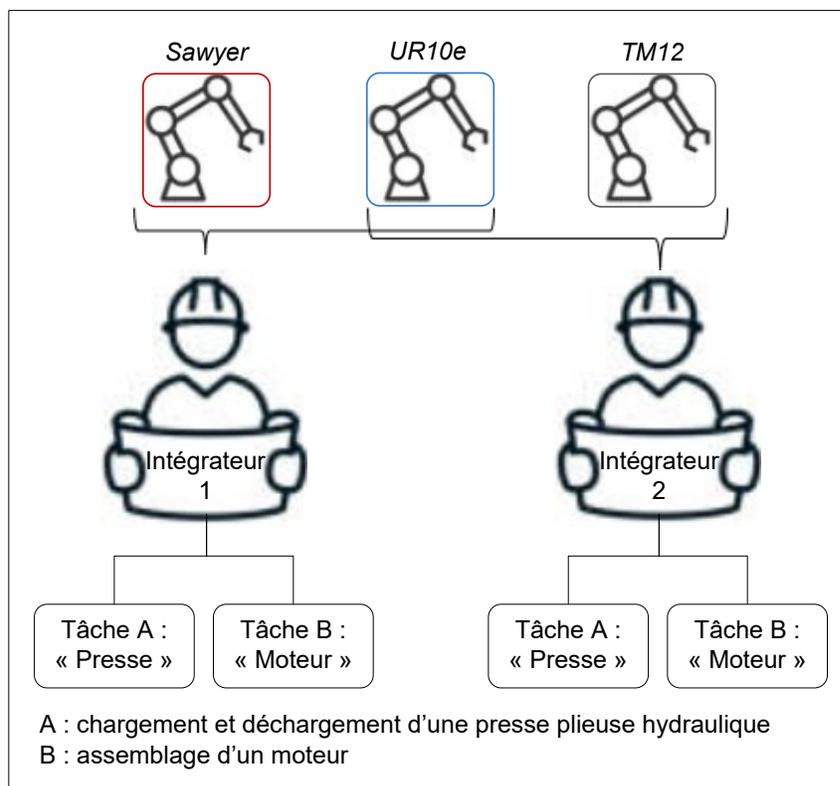
4.1.3 Choisir les cobots

L'équipe de recherche avait à disposition, dans son laboratoire, trois cobots dits « collaboratifs » afin de rendre possible l'intégration en parallèle des tâches par les deux intégrateurs. Ces trois cobots sont : 1) *UR10e* d'*Universal Robots (UR)*, 2) *Sawyer* de *Rethink Robotics* et 3) *TM12* d'*Omron*.

Les critères suivants ont guidé l'équipe de recherche dans le choix des cobots et leur quantité : leur coût, leur taille, leur disponibilité et leur popularité d'utilisation à l'époque et anticipée au Québec, la disponibilité du service après-vente, les avantages et inconvénients relatifs à l'achat et à la location du cobot, la capacité de reproduire les tâches retenues (p. ex. charge utile supérieure au poids total du préhenseur et de la pièce à manipuler, nombre suffisant de degrés de liberté).

L'équipe de recherche a restreint le choix à deux cobots pour chaque intégrateur pour des questions logistiques tel qu'illustré à la figure 4. L'intégrateur pouvait choisir le même cobot pour les deux tâches à cobotiser, s'il le souhaitait. L'équipe de recherche a également mis à la disposition des intégrateurs la liste d'équipements et dispositifs achetés au préalable citée au chapitre 3. Comme certaines des entreprises contactées pour des visites lors de l'étude de Jocelyn *et al.* (2017) possédaient un cobot bien avant l'intégration et souhaitaient y trouver une application industrielle, l'étude actuelle reproduit cette réalité d'entreprise.

Figure 4. Répartition des cobots et des tâches selon l'intégrateur.



4.2 Résultats de la caractérisation

4.2.1 La caractérisation des applications collaboratives

Le tableau 4 présente les résultats de l'analyse des vidéos avec les dix variables d'analyse. Ce travail a permis de proposer cinq classes d'application collaborative distinctes.

Tableau 4. Analyse des 10 vidéos d'applications collaboratives et proposition d'une classification

Les dix variables d'analyse des dix vidéos annoncées au tableau 2											
Application	Tâche	Séquence des opérations	Opérations synchronisées	Synchronisation des gestes	Contrôle de la cadence	Interaction tout du long (durée)	Pièce manipulée	Espace de travail	Distance H-C	Interaction physique volontaire	Classe d'application collaborative identifiée
7- Ensemencement et striure	Même Ensemencement	Alternance	Oui	Oui	Contrôlé surtout par le cobot	Oui	Même	Partagé	Proche	Non	Collaboration directe En alternance
9- Assemblage	Même Assemblage	Alternance	Oui	Non	Contrôlé par l'humain	Oui	Même	Partagé	Proche	Non	Collaboration directe D'assistance
8- Assemblage	Même Assemblage	Assistance	Oui	Oui	Contrôlé par l'humain	Oui	Même	Partagé	Proche	Oui	
10- Meulage	Même Meulage	Assistance	Oui	Oui	Contrôlé par l'humain	Oui	Même	Partagé	Proche	Oui	
1-Emballage & Palettisation	Différente H : Surveillance C : Emballage et palettisation	Séquentiel	Oui	Non	Contrôlé surtout par le cobot	Non	Même	Distinct	Séparé par équipement	Non	Collaboration indirecte Séquentielle
2- Déchargement de machine	Différente H : Assemblage	Séquentiel	Oui	Non	Contrôlé surtout	Non	Différente	Distinct	Séparé par équipement	Non	

Les dix variables d'analyse des dix vidéos annoncées au tableau 2											
Application	Tâche	Séquence des opérations	Opérations synchronisées	Synchronisation des gestes	Contrôle de la cadence	Interaction tout du long (durée)	Pièce manipulée	Espace de travail	Distance H-C	Interaction physique volontaire	Classe d'application collaborative identifiée
	C : Déchargement de machine				par le cobot						
6- Emballage	Différente H : Emballage C : Manutention	Séquentiel	Oui	Non	Contrôlé surtout par le cobot	Non	Différente	Distinct	Séparé par équipement	Non	Collaboration indirecte En parallèle
3- Emballage	Différente H : Autres tâches C : Emballage	En parallèle	Non	Non	L'humain a sa propre cadence	Non	Même	Distinct	Séparé par équipement	Non	
5- Palettisation	Différente H : Contrôle C : Palettisation	En parallèle	Non	Non	L'humain a sa propre cadence	Non	Différente	Distinct	Éloigné	Non	
4- Palettisation	Différente H : Contrôle qualité C : Palettisation	Opération ponctuelle de l'humain	Non	Non	L'humain a sa propre cadence	Non	Même	Partagé ponctuellement	Proche	Non	Partage d'espace occasionnel sans collaboration

Ce sont principalement les variables caractérisant a) la tâche, b) la séquence d'opérations entre l'humain et le cobot, c) la durée de l'interaction entre les agents, d) le partage ou non de l'espace travail et e) la distance entre le cobot et l'humain qui ont permis de différencier trois grandes classes de collaboration. Ces trois classes sont 1) la collaboration directe, 2) la collaboration indirecte et 3) le partage ponctuel de l'espace de travail sans collaboration. Toutefois, à l'intérieur de ces trois classes, d'autres variables permettent de rendre compte plus finement du niveau d'interdépendance des opérations entre le cobot et l'humain. L'analyse montre que la synchronisation des opérations entre le cobot et l'humain exige parfois aussi une synchronisation gestuelle fine par l'opérateur pour interagir avec le cobot, impliquant une interdépendance et un contrôle plus important du cobot sur l'humain. De plus, le contrôle de la cadence du cycle de production par l'humain ou par le cobot exerce une influence sur le niveau d'interdépendance dans la collaboration. Ainsi, pour la collaboration directe, les analyses montrent l'intérêt de distinguer si cette collaboration se caractérise par une alternance des opérations entre l'humain et le cobot et une cadence principalement sous le contrôle du cobot, ou si elle se caractérise plutôt par une collaboration d'assistance dont la cadence est sous le contrôle de l'humain. De la même manière, deux classes de collaborations indirectes ont été définies selon un continuum d'interdépendance. En effet, la collaboration indirecte en parallèle offre plus de marge de manœuvre à l'opérateur humain dans l'organisation de ses tâches et opérations que la collaboration indirecte séquentielle, puisqu'il n'a pas à se synchroniser étroitement avec le cobot. Le fait que l'humain se voit imposer un rythme de travail dicté par la cadence d'un équipement est un facteur de risque de TMS important. De ces cinq classes, la collaboration directe d'assistance est l'unique genre de collaboration constaté qui tire pleinement et simultanément profit du meilleur du cobot (p. ex. sa précision) et de l'humain (p. ex. sa capacité à s'adapter fluidement aux aléas du procédé, sa capacité de prendre des décisions en situation ambiguë). Pour les quatre autres classes, on s'éloigne de l'étroite interaction physique que peut avoir un humain avec un cobot.

Les cinq classes d'applications collaboratives identifiées ont été définies de la manière suivante :

1. **Collaboration directe en alternance** : La collaboration se caractérise par une alternance des opérations entre l'humain et le cobot pendant la réalisation d'une même tâche. L'humain et le cobot sont en interaction du début à la fin de la tâche et partagent le même espace. Les opérations de l'un et de l'autre sont synchronisées et interdépendantes et impliquent également une synchronisation gestuelle de la part de l'humain avec le mouvement du bras du cobot. La cadence est contrôlée surtout par le cobot ou ponctuellement par l'humain ;
2. **Collaboration directe d'assistance** : La collaboration prend la forme d'une assistance à la tâche. Le cobot peut être un outil d'assistance à la force, à la répétition, à la précision qui est adapté aux caractéristiques du produit, du poste de travail, ou de la tâche. L'humain et le cobot sont en interaction du début à la fin de la tâche et partagent le même espace. L'humain assure le contrôle de la cadence et il a des contacts physiques volontaires avec le cobot ;

3. **Collaboration indirecte séquentielle** : La collaboration se caractérise par une série d'opérations consécutives synchronisées réalisées par l'humain ou le cobot, qui n'effectuent pas la même tâche. L'humain et le cobot sont en interaction seulement pendant une partie du cycle sans qu'une synchronisation gestuelle soit nécessaire bien que le cobot contrôle la cadence. D'autres équipements de la ligne de production peuvent servir d'intermédiaire entre l'humain et le cobot et peuvent aussi délimiter l'espace ;
4. **Collaboration indirecte parallèle** : La collaboration se caractérise par une série d'opérations en parallèle réalisées en même temps par l'humain et le cobot, qui n'effectuent pas la même tâche. Les opérations de l'un ne dépendent pas tout le temps des opérations de l'autre. Chacun peut gérer sa propre séquence d'opérations et l'humain a sa propre cadence. D'autres équipements de la ligne de production peuvent servir d'intermédiaire entre l'humain et le cobot et peuvent aussi délimiter l'espace ;
5. **Partage d'espace occasionnel sans collaboration** : L'humain et le cobot réalisent des tâches différentes pour lesquelles ils peuvent être amenés à partager l'espace de travail de façon ponctuelle. Ils peuvent aussi manipuler le même produit pour des raisons différentes dans l'espace de travail qu'ils partagent.

4.2.2 Les deux tâches cobotisées retenues

En adéquation avec les critères mentionnés à la section 4.1.2, les deux tâches qui ont finalement été choisies afin d'être reproduites au laboratoire de l'IRSST sont :

- **Tâche A : chargement-déchargement de machine (*machine tending*)**. Le chargement-déchargement de machine représentait le type de tâche le plus répandu dans les vidéos (tableau 5).

La machine associée au cobot a été une presse plieuse hydraulique. En plus d'être un cas de figure observé sur le terrain, la presse est une machine particulièrement dangereuse en raison de l'accès à sa zone de pliage de pièces, zone de coincement entre les matrices à l'origine d'amputations de parties corporelles par exemple.
- **Tâche B : assemblage**. L'assemblage figurait parmi les tâches, autres que le *pick-and-place*, les plus fréquentes (cf. groupe « Autre » du tableau 5). De plus, l'assemblage présente des situations plus complexes à gérer en matière de risques (Gualtieri *et al.*, 2019). En effet, l'humain intervient proche du cobot lors du processus selon les vidéos analysées contrairement aux tâches de type « pick-and-place ».

Ici, l'assemblage désigne la tâche de l'équipe cobot-humain : le cobot prépare des vis et l'humain les insère dans le châssis d'un moteur pour l'assembler. La version entièrement manuelle de cet assemblage est très présente dans l'industrie aérospatiale et requiert des manipulations fines et répétitives. Ici, nous avons opté pour simuler le moteur par une version miniature et entreprendre la version cobotisée de cet assemblage.

La manutention, l'assemblage et le *Pick-and-place* sont les applications collaboratives les plus typiques en cobotique depuis 2019 et devraient le rester (Xiao, 2021). Ainsi, nous sommes confortables avec les tâches cobotisées retenues.

Tableau 5. Répartition des 27 vidéos consultées selon la famille et le type de tâches cobotisées

Famille	Tâche analysée à partir de vidéos	Fréquence (NB. vidéos)
Pick-and-place	Chargement et déchargement de machine (<i>Machine Tending</i>)	6
	Mise en boîtes	5
	Palettisation	5
Autre	Assemblage	3
	Manipulation	3
	Parachèvement	2
	Prise de vues par caméra (la caméra est installée sur le cobot à la place d'un préhenseur)	1
	Soudure	1
	Test de laboratoire	1

4.2.3 Le cahier des charges succinct

Pour chacune des deux tâches sélectionnées, un cahier des charges succinct a été rédigé. Le cahier des charges comprenait deux parties principales : 1) le contexte de réalisation des processus d'intégration ; 2) les spécificités techniques associées à chacune des deux tâches à reproduire en laboratoire.

À propos du contexte, l'espace disponible au laboratoire (cf. chapitre 3) a été communiqué aux intégrateurs. Une durée maximale de cinq mois devait être consacrée à la mise en œuvre des deux applications collaboratives, incluant les scénarios de variabilités associés (tableau 6 et tableau 7). Chaque application collaborative devait être modulaire afin d'en faciliter le démontage, le réagencement ou le déplacement d'une pièce à une autre. Chacune devait respecter les exigences réglementaires en sécurité des machines du Québec, à savoir la section XXI du *Règlement sur la santé et la sécurité du travail du Québec* (RSST, RLRQ, c. S-2.1, r. 13) et considérer les normes en vigueur en sécurité des machines en général et en robotique (p. ex. : ISO 12100 (ISO, 2010a), ISO 10218 parties 1 et 2 (ISO, 2011a ; ISO, 2011b), CSA Z434 (Association canadienne de normalisation [CSA], 2019). Les intégrateurs devaient soumettre à l'équipe de recherche une application collaborative sécuritaire et productive, ainsi qu'un guide d'utilisation.

À part notre demande générale de respecter le RSST et de considérer les normes en vigueur pertinentes, nous n'avions pas fixé dès le départ des critères de sécurité ni d'ergonomie précis à rencontrer compte tenu du caractère exploratoire de l'étude. Bien que les vendeurs vantent souvent la capacité des cobots à réduire les contraintes mécaniques corporelles au profit de l'ergonomie du poste de travail (ce qui n'est pas le cas systématiquement), nous n'avions pas d'attentes précises et préétablies sur les principes ergonomiques que devait respecter l'intégrateur. En matière d'ergonomie, nous abordions l'étude des processus d'intégrations davantage comme une occasion d'observer avec curiosité si des principes ergonomiques allaient être considérés dans leur processus de réflexion et de mise en œuvre et à quel point. De même, pour l'aspect de

productivité, à part la demande, dans le cahier des charges, de respecter le temps de cycle établi, cet aspect a été abordé de manière qualitative au fil des observations des processus d'intégration. En résumé, nos observations des composantes de sécurité et de productivité demeuraient plutôt ouvertes, afin de découvrir à quel point chacune allait être considérée lors des intégrations et comment les intégrateurs gèreraient le compromis entre les deux.

Tout au long du processus, les intégrateurs ont été filmés, avec enregistrement vocal. Hebdomadairement, l'équipe de recherche a effectué, en réunion virtuelle ou par téléphone, un suivi détaillé de l'évolution de leur travail. Ces suivis duraient entre une à deux heures selon la complexité des sujets à élucider.

Le tableau 6 présente les spécificités techniques de la tâche A « Presse ». Le tableau 7 présente celles de la tâche B « Moteur ». La presse et le moteur devaient être simulés par des assemblages métalliques. Afin de pouvoir synchroniser le cobot avec le fonctionnement de la « presse » (p. ex. nombre de pièces pliées), un pupitre de commande simulant les communications « presse-cobot » pouvait être développé et utilisé par l'intégrateur.

Tableau 6. Résumé des spécificités techniques pour la tâche A « Presse »

Tâche A « Presse »	Chargement-déchargement de machine (<i>Machine Tending</i>)
Application collaborative à reproduire en laboratoire	<p>Le cobot décharge la presse plieuse hydraulique et place la pièce dans un bac.</p> <p><u>Pièce</u> : plaque d'acier, arêtes vives, bords coupants.</p> <p>Deux types de pièces respectant les charges utiles des cobots proposés :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 10 plaques de 3,5 kg chacune et 1/8 po x 6 po x 40 po ; • 10 plaques de 5,5 kg chacune et 1/8 po x 6 po x 60 po. <p><u>Préhenseur</u> : ventouse</p> <p><u>Temps de cycle</u> : durée habituellement recherchée ou recommandée pour ce type d'application industrielle.</p>
Niveau d'interaction avec le travailleur	<p>Occasionnel :</p> <ul style="list-style-type: none"> • le travailleur récupère le bac de larges pièces produites et le remplace par un bac vide ; • il effectue un contrôle qualité devant la presse, dans l'espace de fonctionnement du cobot ; • il corrige les dysfonctionnements du cobot.
Scénarios de variabilités	<p>Pour l'application collaborative, l'intégrateur créera deux à quatre scénarios en changeant des éléments de variabilité. Changer au moins un des éléments de variabilité de la figure 5 créera un scénario de variabilités.</p> <p>Par exemple, nous constaterons au chapitre 5 que l'intégrateur 1 a créé quatre scénarios de variabilité. L'application collaborative avec :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) le chariot parallèle à la presse portant les plaques de 3,5 kg ; 2) le chariot parallèle à la presse portant les plaques de 5,5 kg ;

Tâche A « Presse »	Chargement-déchargement de machine (<i>Machine Tending</i>)
	3) le chariot perpendiculaire à la presse portant les plaques de 3,5 kg ; 4) le chariot perpendiculaire à la presse portant les plaques de 5,5 kg.

Figure 5. Éléments de variabilité retenus pour générer des scénarios de variabilités pour la tâche A « Presse ».

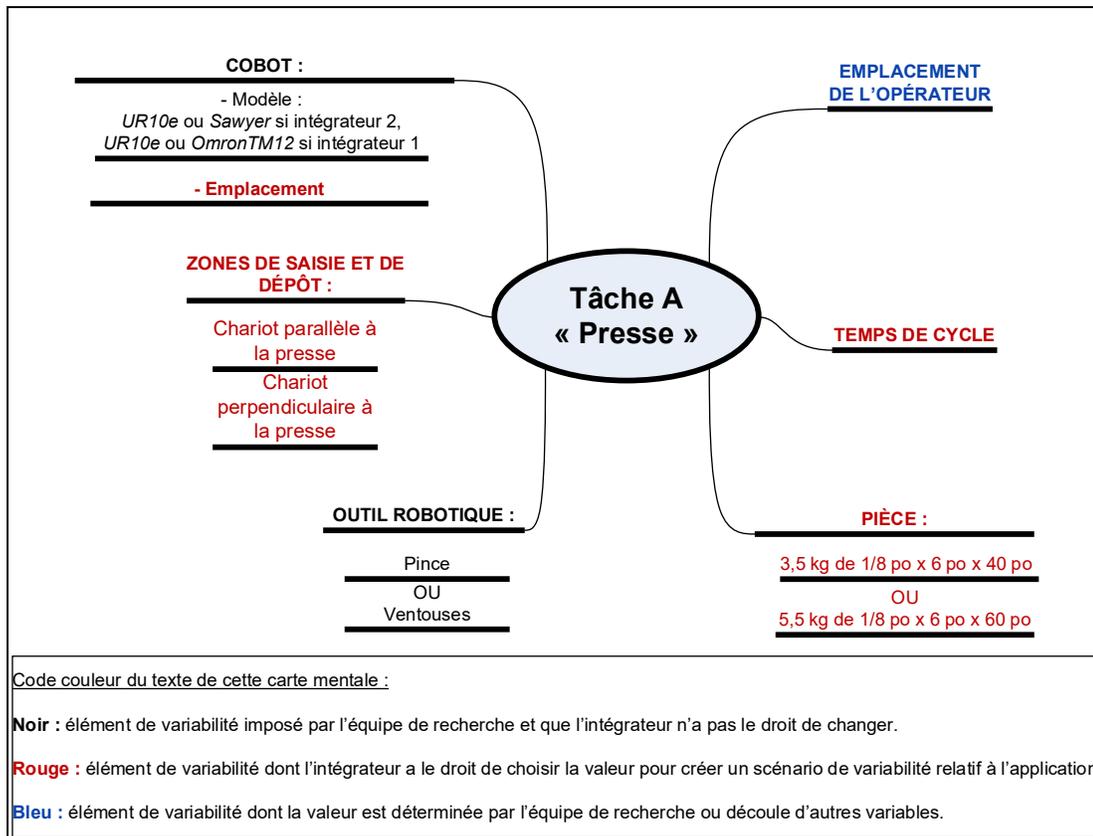


Tableau 7. Résumé des spécificités techniques pour la tâche B « Moteur »

Tâche B « Moteur »	Assemblage + Manipulation
<p>Application collaborative à reproduire en laboratoire</p>	<p>Le cobot saisit une vis placée sur une matrice, puis enduit d'une pâte antifriction les filets de vis. Ensuite, le travailleur insère chaque vis dans le châssis d'un moteur miniature simulé (L : 1 m et Ø 60 cm). Le cobot doit enduire 60 vis par moteur.</p> <p><u>Géométrie de la pièce (figure 6) :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 30 vis noires • 30 vis grises <p><u>Préhenseur :</u> pince.</p> <p><u>Temps de cycle du cobot :</u> ≤ 12 s</p> <p><u>Le moteur :</u> normalement, le moteur tourne sur lui-même pour permettre à un opérateur d'installer une vis sur sa partie inférieure sans avoir à changer de posture. Simuler la rotation du moteur n'est pas obligatoire. Hauteur souhaitée du moteur par rapport à l'opérateur : idéalement, de manière à ce que l'insertion de la vis s'effectue environ à la même hauteur que la prise de la vis, pour éviter à l'opérateur de forcer de manière répétitive.</p> <p><u>La matrice :</u> l'intégrateur concevra et fabriquera une ou deux matrice(s) en plastique où les vis seront agencées de manière à être prises facilement par le cobot. La matrice recevra 60 vis disposées la tête vers le haut. Sinon, deux matrices comprendront 30 vis chacune. Les dimensions de la matrice doivent être inférieures à celles de la table.</p> <p><u>Le distributeur :</u> il pèse 6 kg. Une table solidaire du socle du cobot portera le distributeur et la matrice. Bien que le distributeur soit réel au laboratoire, la pâte sera imaginaire en raison des difficultés d'approvisionnement.</p> <p><u>Le cobot et la table portant la matrice et le distributeur :</u> ils devront pouvoir être déplacés le long du moteur. L'ensemble sera stable pour minimiser le risque de basculement.</p> <p><u>Le travailleur :</u> normalement, il se trouve en permanence devant et à mi-chemin entre le cobot et le moteur, prêt à recevoir la vis tendue par le bras cobotisé.</p>
<p>Niveau d'interaction avec le travailleur</p>	<p>Très fréquent :</p> <ul style="list-style-type: none"> • le travailleur prend directement la vis enduite que lui présente le cobot pour l'insérer dans le moteur ; • il corrige les dysfonctionnements du cobot.
<p>Scénarios de variabilités</p>	<p>Pour l'application collaborative, l'intégrateur créera deux à quatre scénarios en changeant des éléments de variabilité. Changer au moins un des éléments de variabilité de la figure 7 créera un scénario de variabilités.</p> <p>Par exemple, nous constaterons au chapitre 5 que les deux intégrateurs ont créé deux scénarios de variabilité. L'application collaborative avec :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) les vis grises posées dans une matrice ; 2) les vis noires posées dans une autre matrice à un emplacement différent sur la table.

Figure 6. Les vis utilisées pour la tâche B « Moteur ».

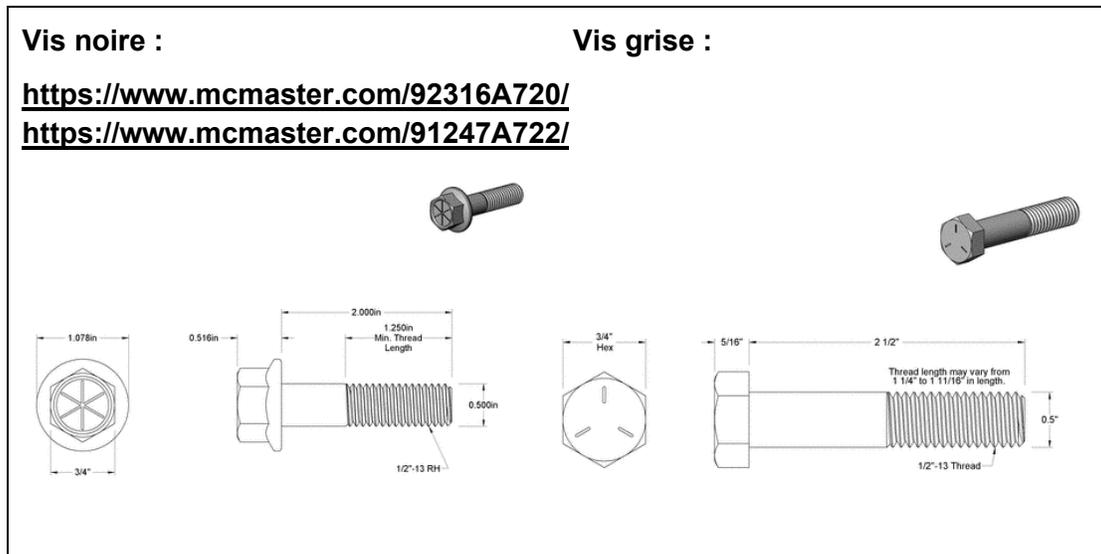
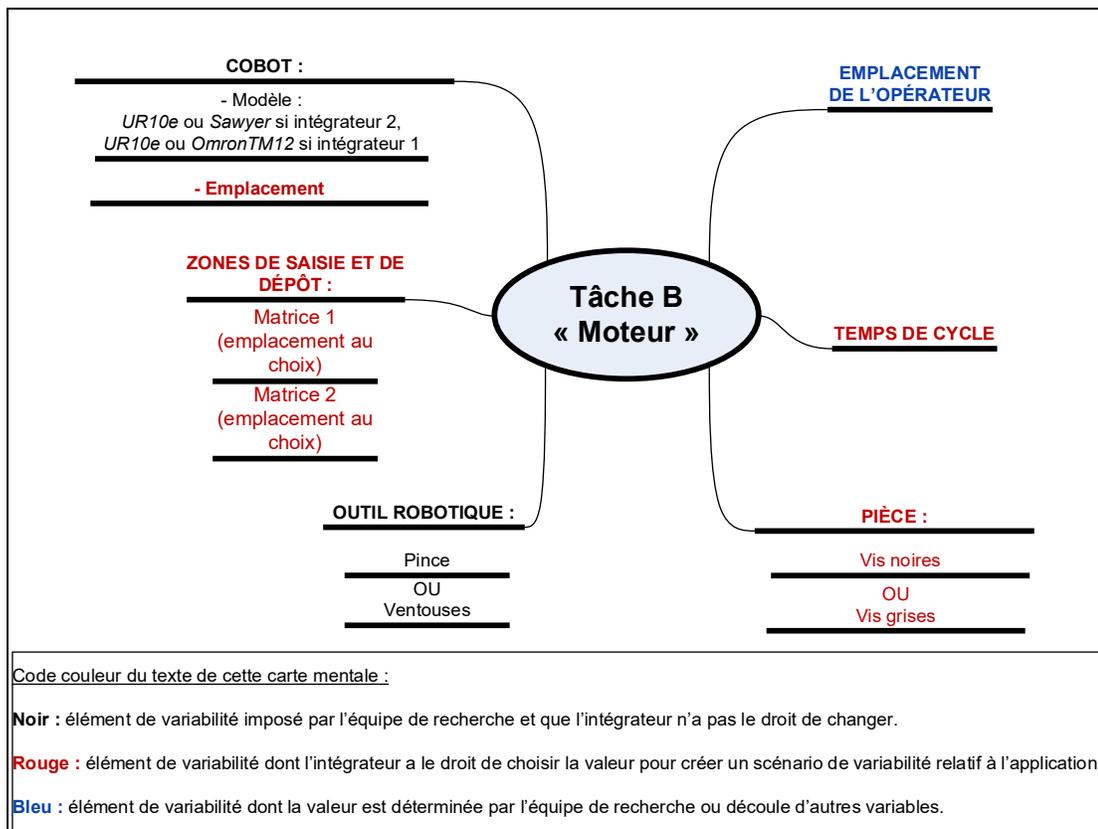


Figure 7. Éléments de variabilité retenus pour générer des scénarios de variabilités pour la tâche B « Moteur ».



5. INTÉGRATION DE QUATRE CELLULES COBOTIQUES ET ANALYSE DES PROCESSUS ASSOCIÉS

Dans un premier temps, ce chapitre décrit sommairement la méthode adoptée par chacun des deux intégrateurs pour mettre en œuvre les cellules cobotiques relatives aux applications « Presse » (tâche A) et « Moteur » (tâche B) (cf. section 5.1). Il s'agit de la méthode correspondant à l'objectif spécifique 2 de l'étude (cf. section 2.2). Ensuite, ce chapitre présente pour chaque tâche et chaque intégrateur, le fonctionnement et l'agencement des composantes de la cellule cobotique, les choix de l'intégrateur en matière d'appréciation des risques, de réduction des risques, ainsi que l'analyse de son processus d'intégration ponctué des problèmes solutionnés. Ainsi, les sections 5.3 et 5.4 couvrent la tâche A « Presse » respectivement pour l'intégrateur 1 puis l'intégrateur 2. Les sections 5.5 et 5.6 couvrent la tâche B « Moteur » respectivement pour l'intégrateur 1 puis l'intégrateur 2. L'analyse du processus d'intégration présentée à la section 5.2 permet de répondre à l'objectif spécifique 3 du projet (cf. section 2.2) visant à cerner les éléments de prise de décision des intégrateurs.

5.1 Méthodes des deux intégrateurs

5.1.1 Méthodes des intégrateurs pour protéger l'opérateur

Intégrateur 1

L'intégrateur 1 était une équipe d'ingénieurs et de techniciens, aux expertises distinctes, d'une entreprise québécoise en automatisation. Cette équipe, conduite par un ingénieur-chef de projet, comprenait un ingénieur avec des bases en sécurité des machines et une connaissance des normes en sécurité pertinentes à la robotique : ISO 10218-2 (ISO, 2011b), CSA Z434 (CSA, 2019), CSA Z432 (CSA, 2016), ainsi que de la spécification technique ISO/TS 15066 (ISO, 2016). L'intégrateur 1 a utilisé la démarche recommandée par la norme CSA Z432 (protection des machines) et notamment la figure 5.1 de la norme pour structurer son appréciation et sa réduction du risque (CSA, 2016). Il s'agit de la démarche de référence en sécurité des machines, aussi utilisée dans la norme ISO 12100 (ISO, 2010a) avec l'identification des phénomènes dangereux, l'estimation des risques initiaux, le choix de mesures de réduction du risque en privilégiant les mesures à la conception puis l'estimation des risques résiduels. Plus spécifiquement, l'intégrateur 1 s'est basé sur les outils décrits à l'annexe DVA de la norme CSA Z434 sur les robots industriels et les systèmes robotiques (CSA, 2019). Il a utilisé l'annexe DVA.2 pour le choix de l'outil d'estimation du risque. Cet outil comprend trois paramètres (gravité, exposition et évitement) pour quatre niveaux de risque (afin de prioriser les risques). Il a utilisé l'annexe DVA.3 pour guider ses choix en matière de réduction du risque. Le canevas pour l'appréciation du risque formelle a été construit durant son intégration de la tâche A, mais pas au tout début, puisque l'intégrateur n'en possédait pas encore un aussi formel. Dans son canevas (cf. section 5.3.1, tableau 8 ou section 5.5.1, tableau 14), l'intégrateur 1 a présenté les risques selon le type de phénomène dangereux (p. ex. mouvement du cobot) ou selon l'opération (p. ex. prise de la vis par l'opérateur) sans

entrer dans le détail des différentes situations dangereuses. Les différentes phases du cycle de vie de la cellule ont été mentionnées (p. ex. fonctionnement normal, configuration, dépannage, entretien et réparation), mais ont été considérées dans leur globalité dans la grille d'analyse de risques remise. L'intégrateur précise que si des modifications sont apportées à l'installation (p. ex. mécanique, électrique, programmation, type de pièces manipulées, emplacement de la machine), l'analyse de risques effectuée peut être invalide en partie ou en totalité.

À la demande de l'intégrateur 1, la validation de chacune des deux cellules cobotiques s'est réalisée avec un test FAT (*Factory Acceptance Test*) chez l'intégrateur 1 suivi d'un test SAT (*Site Acceptance Test*) à l'IRSST. Le contenu de ces tests était identique et visait à vérifier les éléments clés témoignant du fonctionnement de chaque cellule cobotique, comme attendu dans le cahier des charges. Ces tests comprenaient des critères à vérifier dans cinq sections : électrique (4 critères), mécanique (11 critères), cobot (5 critères), automatisation (8 critères), sécurité (11 critères), questions et commentaires. Comme leurs noms l'indiquent, l'intégrateur a réalisé le FAT dans ses locaux, en présence de membres de l'équipe de recherche. Cependant, il a effectué le SAT au laboratoire de l'IRSST, toujours en présence de membres de l'équipe de recherche.

Intégrateur 2

L'intégrateur 2, un étudiant à la maîtrise en génie de la production automatisée, découvrait la sécurité des machines dans le cadre de cette étude. Après avoir simulé le fonctionnement préliminaire de ses cellules cobotiques pour les tâches A puis B, l'intégrateur 2 les a mis en œuvre successivement au laboratoire de l'IRSST. Il a bénéficié des conseils de ses co-directeurs de recherche pour prendre en considération les règles de l'art dans ce domaine. L'intégrateur 2 a utilisé les normes de référence ISO 12100 (ISO, 2010a) et ISO 10218-2 (ISO, 2011b) en sécurité des machines et en robotique pour apprécier les risques et procéder à la réduction des risques (ISO, 2010a ; ISO, 2011b). Pour cela, il a aussi utilisé l'ISO/TS 15066 (ISO, 2016). Son tableau d'appréciation du risque développé reprend les principes de la norme ISO 12100 (ISO, 2010a) avec, pour chaque phénomène dangereux, des situations et des événements dangereux associés, une estimation du risque initial et résiduel ainsi que les mesures de réduction du risque choisies. Après avoir consulté divers outils d'estimation du risque en sécurité des machines (p. ex. ceux étudiés dans Chinniah *et al.*, 2011), l'intégrateur 2 a opté pour un outil qui comporte peu de biais selon les critères établis par Gauthier *et al.* (2016) et qui permet la correspondance entre les indices de risque et les niveaux de performance requis pour les éventuelles fonctions de sécurité utilisées. L'outil choisi est le *Scalable Risk Analysis & Estimation Method* (SCRAM) qui comporte 4 paramètres (c.-à-d. gravité, exposition et évitement du dommage ainsi que la probabilité d'occurrence de l'événement dangereux), afin d'évaluer le niveau de risque selon 11 niveaux (de 0 à 10). Le canevas pour l'appréciation du risque formelle a été construit tout au long de sa première intégration puisque l'intégrateur n'en possédait pas. L'intégrateur 2 a choisi de structurer son processus d'identification des risques et de réduction des risques selon différentes

phases du cycle de vie de la cellule cobotique (cf. section 5.4.1, Tableau 11 ou section 5.6.1, Tableau 17). Il s'y est pris de manière très spécifique. Par exemple, il a fait une distinction entre les risques lors de l'intégration pour un intégrateur, lors du fonctionnement pour un opérateur et lors de la maintenance pour un technicien.

L'intégrateur 2 n'a exigé aucun test spécifique de validation, à part la vérification que les exigences du cahier des charges soient rencontrées pour ses deux cellules cobotiques.

Enfin, du point de vue de la sécurité de l'opérateur, une dernière itération de l'appréciation des risques a conclu le processus d'intégration de chaque cellule cobotique, dans le cas des deux intégrateurs. Ces derniers ont jugé que les risques résiduels de leurs cellules cobotiques étaient acceptables.

Gardons en tête qu'en plus d'être en contexte de laboratoire où toutes les contraintes industrielles ne peuvent être reproduites, avoir simulé certaines parties du matériel (p. ex. : presse, moteur, pâte antifricction) nous éloignent quelque peu des cellules cobotiques traduisant fidèlement la réalité industrielle. Ainsi, l'étude de la manière dont le compromis sécurité-productivité aura été géré par l'intégrateur restera teintée de ces limites matérielles. Par exemple, les intégrateurs ont géré théoriquement les risques induits par la pâte antifricction, malgré le caractère imaginaire de celle-ci dans les procédés mis en œuvre.

5.1.2 Méthodes des intégrateurs pour se protéger

L'activité d'intégration comporte des risques pour l'intégrateur lui-même. Les intégrateurs passaient beaucoup de temps en test près du cobot, de son préhenseur ou de la pièce. Par exemple, l'intégrateur 1 était parfois accroupi à travailler avec le pendant d'apprentissage (*teach pendant*) ou son ordinateur portable, avec la tête au niveau de la pièce ou avec le cobot derrière lui (tâche A). Toujours pour la tâche A, l'intégrateur 2 se plaçait entre l'arrière de la presse simulée et le mur jaune (cf. flèche symbolisant l'intégrateur 2 à la figure 8) avec le risque de se faire coincer par le cobot en mouvement ; il se mettait en danger afin de s'assurer que le cobot, sa pièce et son préhenseur ne coinceraient jamais le futur opérateur. Dans le cadre de la tâche B, la figure 9 montre que le programmeur de l'intégrateur 1 pouvait adopter une mauvaise posture en manipulant directement le cobot, alors qu'il faisait de son mieux pour trouver la trajectoire la plus appropriée pour réaliser la tâche du cobot tout en protégeant le futur opérateur. De manière générale, les intégrateurs utilisaient l'arrêt d'urgence ou mettaient le programme de test en pause lorsqu'ils intervenaient proche du cobot. Par exemple, l'intégrateur 1 arrêtait le cobot et le débranchait avant de travailler dans l'armoire électrique. Pour la mise en œuvre de la tâche A « Presse », les deux intégrateurs utilisaient des gants afin de manipuler les plaques d'acier pour éviter de se couper. L'intégrateur 2 en portait aussi dans le cadre de l'application « Moteur » en raison de la graisse résiduelle issue du procédé de fabrication des vis. Pour se protéger lors des tests de l'application « Presse » et lors d'ajustements de programmation, l'intégrateur 1 utilisait la stratégie suivante : 1) les tests s'effectuaient à vide (validation de trajectoire) et avec la commande par à-coup de l'*UR10e*, 2) il utilisait une pièce en carton pour simuler une plaque d'acier, 3) finalement, il

utilisait des plaques d'acier. Les tests des intégrateurs s'effectuaient à vitesse réduite, avec le pendant d'apprentissage, surtout au début de leur processus d'intégration et lors de changements de programmation en direct. Plus tard dans le processus d'intégration, les intégrations testaient leurs cellules cobotiques à vitesse de production pour s'assurer de leur fonctionnement adéquat.

Figure 8. Flèche symbolisant l'emplacement de l'intégrateur 2 dans la zone de coincement entre le mur jaune et l'arrière de la presse simulée.

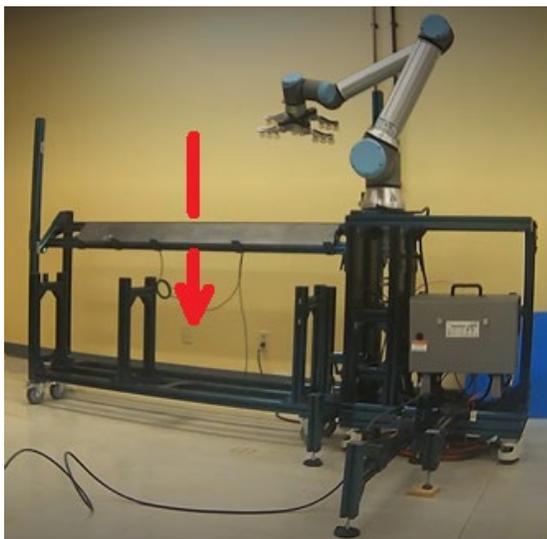
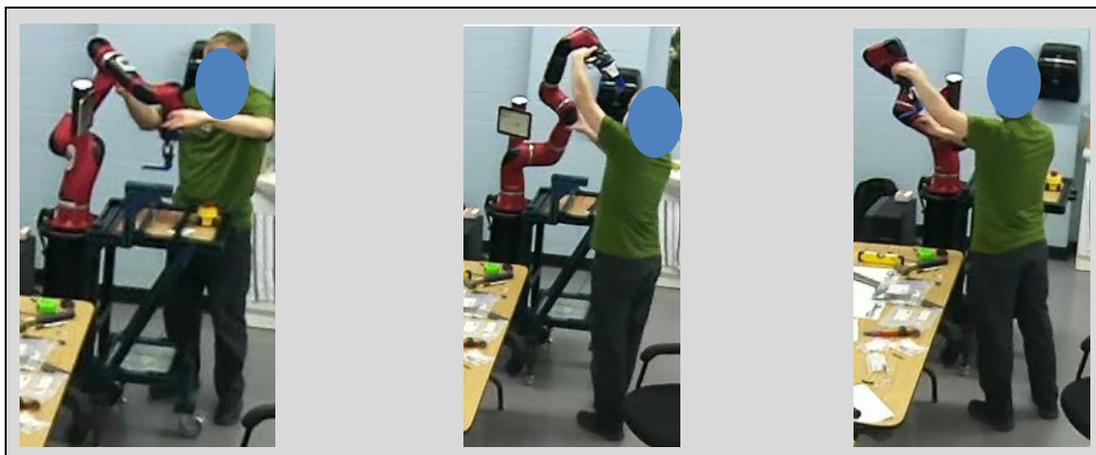


Figure 9. Positionnement de l'intégrateur 1 par rapport au cobot lors de la programmation de la tâche B « Moteur ».



5.2 Méthode d'analyse des éléments de prises de décisions des intégrateurs

Les transcriptions des réunions d'avancement du côté de l'intégrateur 1 (équipe d'ingénieurs et de techniciens) ($n = 11$) et les réunions hebdomadaires de suivi de l'intégrateur 2 (étudiant) ($n = 22$) ont représenté les sources de données principalement utilisées pour décrire et analyser progressivement le processus d'intégration des cellules cobotiques. Ces réunions étaient essentiellement basées sur des échanges entre l'équipe

de recherche et les intégrateurs. Elles ont permis aux membres de l'équipe de recherche de questionner les intégrateurs afin que ceux-ci puissent expliciter leurs préoccupations, leurs questionnements, leurs priorités, de même que les critères et les motifs les ayant guidés à travers leurs choix de conception et les moyens utiliser pour s'assurer de la sécurité de l'opérateur final.

L'intégration de l'application « Moteur » par l'intégrateur 1 a été la première à être décrite, analysée et modélisée. Pour ce faire, une mise à plat de la répartition des tâches effectives de chaque membre de l'équipe d'ingénieurs (intégrateur 1) à partir d'un outil de suivi conçu par le chargé de projet a permis de décrire progressivement le déroulement dans le temps du processus d'intégration dans toute sa complexité. Les rencontres d'avancement entre l'équipe de recherche et l'intégrateur 1 permettraient, à travers les échanges entre eux ou avec l'équipe de recherche, de retracer leurs réflexions et les critères de décision sous-jacents. Une première schématisation du processus a été conçue sur un fichier PowerPoint, en créant simplement des cases se succédant et décrivant chaque étape du processus, la nature des réflexions ainsi que les décisions et les choix réalisés tout au long du processus.

Cette analyse a permis d'identifier les grandes phases à travers lesquelles le processus d'intégration s'est organisé. De plus, les moyens créatifs, techniques et d'organisation du travail utilisés par les intégrateurs pour avancer dans le processus d'intégration et aborder les problèmes de conception, à l'intérieur de chacune des phases ont également été décrits. Finalement, les éléments de prises de décisions verbalisées par l'intégrateur, c'est-à-dire leurs préoccupations et les éléments qui ont influencé leurs décisions ou alimenté leurs réflexions, ont été associés à chaque élément composant la cellule cobotique.

Cette première expérience d'analyse de la démarche des intégrateurs, en même temps qu'elle a mené à l'élaboration d'un premier schéma synthèse visant à illustrer le processus d'intégration de l'application « Moteur » par l'intégrateur 1 (voir la section des résultats qui suit), a aussi permis de générer et de stabiliser une méthode de travail pour les analyses subséquentes des trois autres processus. Ainsi, à travers l'analyse du processus d'intégration de l'application « Presse » de l'intégrateur 1 qui a suivi, cette méthode de travail a pu être améliorée et surtout simplifiée, de sorte qu'elle permettait de tirer l'essentiel des résultats disponibles et qu'elle pouvait être plus spécifiquement orientée pour servir l'objectif 3 du projet, c'est-à-dire identifier les éléments de prises de décision des intégrateurs pour chacun des quatre processus d'intégration.

Plus concrètement, cette méthode a consisté, dans un premier temps, en une première lecture des transcriptions, visant à prélever les extraits où des éléments de conception (réflexions, décisions, choix, problèmes de conception, etc.) apparaissaient, pour les rassembler en ordre chronologique sur un fichier synthèse *Word*. Au fur et à mesure de cette transposition des extraits des verbatims recensés, un titre ou une phrase clé (par exemple « choix du cobot » ou « conception des matrices ») ont été ajoutés, afin de résumer le contenu des extraits. En parallèle, les extraits permettant déjà de déceler des

éléments de prise de décision ont été mis en caractères gras, afin de les repérer facilement ultérieurement. Dans un second temps, une grille synthèse a été élaborée dans la perspective de concevoir un schéma semblable au premier qui avait été développé ; cette grille visait donc à recenser et organiser l'information en trois colonnes : une colonne « Phase », une colonne « Décisions/réflexions » et une colonne « Préoccupations » (les éléments de prises de décision). Ainsi, pour chacune des trois analyses du processus d'intégration ayant suivi la première, l'information d'abord ciblée dans les transcriptions et rapportée sur un fichier synthèse Word a par la suite été traitée (résumée et réduite à l'essentiel) de manière à être transposée dans la grille synthèse servant de base à la conception de chacun des schémas synthèses. Une fois chacune des grilles remplies, le schéma synthèse lui correspondant a été conçu.

Limites de la schématisation du processus d'intégration

Les schémas ont été développés dans le but d'illustrer le processus d'intégration de chacune des applications de la façon la plus simple et synthétisée possible. Cela dit, chacun des processus en lui-même est complexe et son analyse implique une grande quantité d'informations : réflexions, prises de décisions, actions diverses en amont de la conception de l'application et une fois en laboratoire, de même qu'une fois l'application conçue et installée. Chacun des schémas vise donc une représentation allant à l'essentiel et s'attardant aux étapes qui ont semblé névralgiques dans le processus, mais il ne peut prétendre contenir tout le processus dans ses moindres détails. De la même manière, pour chacune des réflexions ou prises de décisions se succédant, tous les éléments de prises de décision leur étant associés n'ont pas pu être inclus sur le schéma. Ainsi, pour une décision qui semblait avoir été influencée par plusieurs préoccupations, celle qui apparaissait la plus importante pour l'intégrateur est la seule à apparaître sur le schéma.

5.3 Résultats pour la tâche A « Presse » avec l'intégrateur 1

5.3.1 Intégrateur 1 – Tâche A : application collaborative, appréciation et réduction du risque

L'intégrateur 1 a choisi le cobot UR10e pour manipuler, les plaques métalliques annoncées au cahier des charges. Le pupitre de commande qui a été développé permet de spécifier les caractéristiques du lot de production : nombre de pièces, temps de cycle, type de pièce (selon ses dimensions), chariot à utiliser pour la pose de plaques métalliques. L'armoire de commande traitant l'ensemble de signaux comprend un automate programmable standard et un automate programmable dédié à la sécurité communiquant tous les deux avec le contrôleur du cobot. À l'aide d'un préhenseur à ventouse, le cobot récupère chaque plaque métallique sur la presse simulée. Ensuite, il le dépose soit sur le chariot situé en avant et en parallèle à la presse, soit sur celui placé perpendiculairement à celle-ci. Ainsi, l'intégrateur 1 a choisi trois types d'éléments de variabilité pour son processus :

1. le temps de cycle : on pouvait le changer à même le pupitre de commande conçu par l'intégrateur 1. Ce changement affectait la vitesse du cobot sans menacer la sécurité de l'humain grâce aux dispositifs de protection mis en place ;

2. la masse des pièces en acier : deux dimensions suffisamment différentes créaient une fluctuation de charge pour le cobot ;
3. la zone de dépôt : deux chariots avec un emplacement différent.

Deux photos illustrent la cellule cobotique et ses composantes mises en œuvre par l'intégrateur 1 dans ses locaux, pour la tâche A « Presse » (figure 10 et figure 11).

Figure 10. Agencement de composantes dans la cellule cobotique de la tâche A « Presse » par l'intégrateur 1 (source : rapport de l'intégrateur 1).

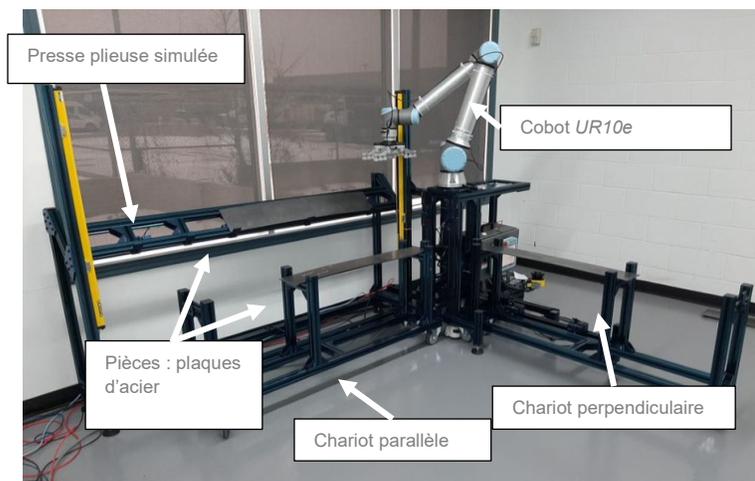
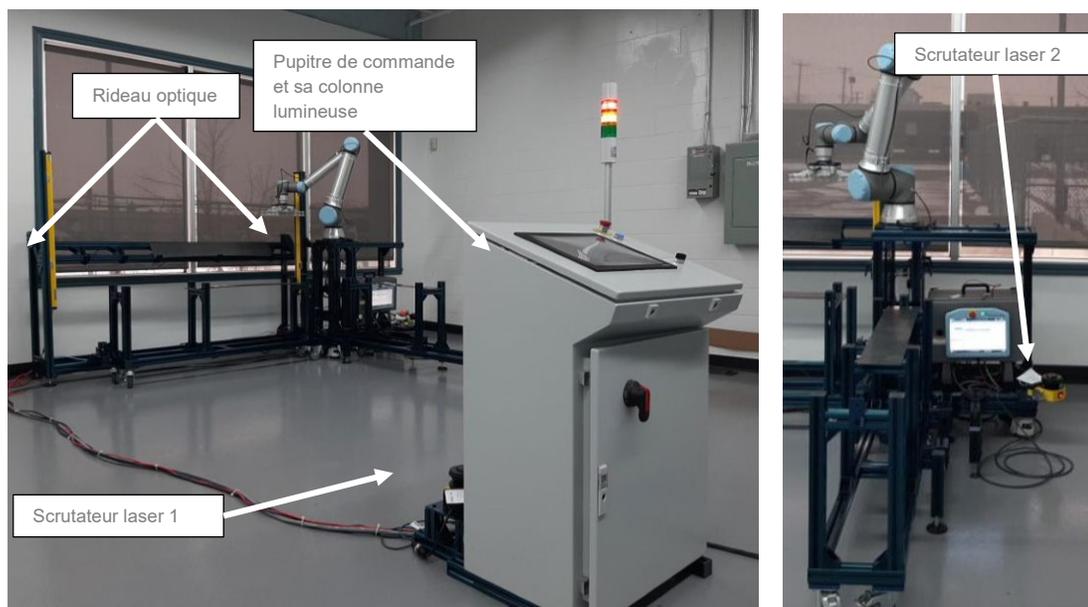


Figure 11. Agencement des dispositifs de sécurité dans la cellule cobotique de la tâche A « Presse » par l'intégrateur 1 (source : rapport de l'intégrateur 1).



Le tableau 8 résume l'analyse et la réduction des risques effectuées par l'intégrateur 1 pour la tâche A. Les dommages associés aux phénomènes dangereux identifiés sont les suivants : choc, écrasement, cisaillement, chute, trébuchement, coupure ou lacération. Ce tableau présente aussi l'estimation des risques initiaux (sans mesure de réduction) et résiduels (avec mesures). Le ratio « 4/4 » correspond au niveau de risque le plus haut en adéquation avec l'outil utilisé.

Tableau 8. Synthèse du travail d'analyse des risques et de réduction des risques remis par l'intégrateur 1 pour la « Presse »

No.	Phénomène dangereux ou événement dangereux ou tâche identifiés et explications		Mesure de réduction du risque	Risque	
				Initial	Résiduel
1	Perte de l'aspiration au niveau des ventouses	Pièce projetée ou échappée, en raison d'une force aspirante insuffisante. Un manque d'air comprimé ou la présence de poussières sur la surface aspirante des ventouses ou sur la surface de contact d'une pièce manipulée peuvent expliquer cette insuffisance.	<ul style="list-style-type: none"> • Deux scrutateurs laser, niveau de performance PLd avec catégorie 3, pour détecter une intrusion dans la zone. La détection par l'un d'entre eux déclenche un arrêt du cobot. Une distance de sécurité est calculée et vaut 2 m pour chaque scrutateur laser (distance minimale entre le chariot de dépôt de pièces et le point de détection de l'opérateur, point situé sur le contour de la zone de sécurité couverte par le scrutateur laser). • Cette distance inclut la distance de projection des pièces. Ainsi, le travailleur ne se retrouvera pas à proximité du cobot et de la pièce lors d'une potentielle projection. • Modifier la connexion électrique du préhenseur pour utiliser une alimentation électrique 24 V CC externe qui ne sera pas interrompue lors d'un arrêt d'urgence ou d'une faute du cobot. Cela maintiendra l'aspiration et évitera ainsi l'échappement de la pièce manipulée. • À chaque quart de travail : vérifier l'état des ventouses, les nettoyer ou les changer au besoin. Changer, si besoin, les filtres du préhenseur. • À chaque quart de travail : vérifier les pièces sortant de la presse. Si la quantité d'huile, de poussière ou 	4/4	2/4

No.	Phénomène dangereux ou événement dangereux ou tâche identifiés et explications		Mesure de réduction du risque	Risque	
				Initial	Résiduel
			d'autres contaminants est trop élevée sur les pièces, appliquer des mesures d'atténuation et d'élimination.		
2	Chute du préhenseur car défaillance du porte-outil robotique	Dégagement fortuit du préhenseur.	<ul style="list-style-type: none"> • Scrutateurs laser cités à la ligne 1. 	4/4	2/4
3	Chute de plain-pied (cas du chariot parallèle)	Un pied du travailleur s'accroche sur une barre de positionnement du chariot parallèle, en raison de la barre qui dépasse.	<ul style="list-style-type: none"> • Modifier la position du chariot parallèle de sorte que sa barre de positionnement devienne inaccessible. Ainsi, aucune barre ne constituera un obstacle au sol lors de l'accès à la presse ou aux chariots. 	4/4	2/4
4	Test de la portée du cobot lorsque celui-ci est fixé sur son socle	Lorsque le cobot est en pleine extension dans la direction de la longueur du chariot, l'arrière du socle de fixation du cobot se soulève. Cela peut causer un basculement du cobot et du chariot.	<ul style="list-style-type: none"> • Ajouter un support au socle du cobot de manière à augmenter sa stabilité et ainsi, empêcher son basculement en pleine extension. 	4/4	1/4
5	Manipulation des pièces par l'opérateur	Manipulation des pièces lors de l'inspection, du ramassage d'une pièce ou lors de toute autre action pertinente.	<ul style="list-style-type: none"> • Exiger le port d'EPI lors de la manipulation des pièces : <ul style="list-style-type: none"> ○ chaussures de sécurité avec embout protecteur obligatoire ; ○ gants protégeant contre les coupures ; ○ lunettes de sécurité. • Formation sur la méthode sécuritaire pour manipuler les pièces. 	2/4	1/4
6	Assemblage ou désassemblage de la cellule	<ul style="list-style-type: none"> - Manipulation d'arêtes vives d'extrusions d'aluminium composant le socle du cobot. - Manutention ou chute de composantes pesantes : chariots, presse simulée. 	<ul style="list-style-type: none"> • Exiger le port d'EPI (p. ex. gants anti-coupures) lors de la manipulation des pièces. • Méthodes de travail : <ul style="list-style-type: none"> ○ Utiliser des chariots pour déplacer les composantes lourdes ; ○ Adapter les méthodes de travail et demander 	4/4	2/4

No.	Phénomène dangereux ou événement dangereux ou tâche identifiés et explications		Mesure de réduction du risque	Risque	
				Initial	Résiduel
			l'aide de travailleurs pour manipuler les composantes lourdes. <ul style="list-style-type: none"> Ébavurer les arêtes vives des extrusions (idéalement, par le fabricant lors de leur coupe). 		
7	Mouvement du cobot (notamment lors de l'inspection d'une pièce dans le chariot ou la manutention des chariots)	<p>Le cobot effectue des mouvements pour prendre une pièce sur la presse, puis pour la déposer dans l'un des deux chariots. Par la suite, le cobot retourne sans pièce vers la presse pour recommencer la séquence.</p> <p>Lorsque le cobot est en mouvement, plusieurs risques sont présents :</p> <ul style="list-style-type: none"> risque d'impact entre le cobot et le travailleur ; risque d'impact entre la pièce et le travailleur ; risque de coupure ou de lacération causé par la pièce. <p>Certains phénomènes dangereux peuvent être amplifiés par la trajectoire du cobot, comme lorsque le cobot va déposer la pièce dans le chariot perpendiculaire, le mouvement de rotation de la pièce augmente la zone dans laquelle un travailleur est exposé aux phénomènes dangereux.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Scrutateurs laser cités à la ligne 1. Modifier la programmation du cobot pour privilégier une rotation des pièces qui couvre une zone plus restreinte. Limiter l'amplitude des joints du cobot pour permettre le déplacement de chacun des joints seulement dans la plage requise pour que le cobot puisse effectuer ses tâches. Limiter la zone de travail du cobot en utilisant des plans de sécurité virtuels. Limiter les mouvements de la pièce à l'intérieur de la zone de travail du cobot en programmant une zone de sécurité virtuelle englobant les extrémités de la plus longue pièce. Port d'EPI pour se protéger du contact avec les pièces : lunettes, chaussures de sécurité et gants. 	4/4	1/4
8	Déplacer le cobot en utilisant le mode de guidage à la main (<i>free drive</i>)	Lors du mode de guidage manuel du cobot, le travailleur doit appuyer sur un bouton de validation avec une main, en plus de manipuler physiquement le cobot ou le faire bouger depuis l'écran du pendant d'apprentissage avec l'autre main. Bien que le	Établir une procédure : <ul style="list-style-type: none"> vérifier le poids du préhenseur dans l'interface du cobot. Changer le poids pour qu'il corresponde à celui du préhenseur sans pièce (si aucune pièce n'est présente sur le préhenseur) ; 	2/4	1/4

No.	Phénomène dangereux ou événement dangereux ou tâche identifiés et explications		Mesure de réduction du risque	Risque	
				Initial	Résiduel
		travailleur ait le contrôle du cobot en mode de guidage manuel, un événement dangereux peut survenir si une pièce était maintenue par le préhenseur et que la pièce est retirée (p. ex. chute accidentelle de la pièce, pièce retirée du préhenseur par le travailleur, etc.). En effet, dans ce cas, le comportement du cobot peut devenir imprévisible puisque la masse réelle ne correspond pas à la masse configurée. Ainsi, le cobot pourrait effectuer un déplacement non désiré vers le haut ou vers le bas.	<ul style="list-style-type: none"> faire cela avant d'effectuer les mouvements du cobot en mode de guidage manuel. 		
9	Déplacer le cobot en mode manuel avec le pendant d'apprentissage en étant à proximité	Un mode manuel qui ne limite pas la vitesse du cobot à une valeur favorisant l'évitement du dommage, ainsi que l'absence de dispositif de validation à 3 positions (section 5.8.3 de l'ISO 10218-1 [ISO, 2011a]) expose le travailleur aux mêmes risques qu'en mode automatique.	<ul style="list-style-type: none"> Une solution intermédiaire est d'utiliser la fonction de mode réduit (<i>reduced mode</i>) du cobot <i>UR10e</i> ainsi qu'un interrupteur de sélection de mode pour limiter la vitesse et la force du cobot lorsque le sélecteur sera en mode manuel. Le cobot est ainsi limité en mode manuel, mais le travailleur n'a pas de dispositif de validation à 3 positions de disponible. Former les travailleurs manipulant le cobot. 	4/4	1/4
10	Accéder à la zone dangereuse de la presse	En plus des phénomènes dangereux de la presse, le travailleur est également exposé au phénomène dangereux du cobot lors des opérations d'ajustement, de correction de problème et d'entretien.	<ul style="list-style-type: none"> Rideau optique de sécurité devant l'ouverture de la presse pour empêcher le cycle de la presse si un travailleur ou un objet (comme le cobot) se trouve dans la zone de la presse. Scrutateurs laser cités à la ligne 1. 	4/4	1/4
11	Ramasser une pièce tombée au sol	Ramasser une pièce au sol échappée par le cobot en mouvement. Le cobot devrait s'arrêter lors de la perte de la	<ul style="list-style-type: none"> Idem que ligne 7 pour empêcher le fonctionnement du cobot lorsque le travailleur 	4/4	1/4

No.	Phénomène dangereux ou événement dangereux ou tâche identifiés et explications	Mesure de réduction du risque	Risque	
			Initial	Résiduel
	<p>force d'aspiration, puisque la fonction a été programmée dans le <i>URCap</i> (assistant de programmation du préhenseur <i>VG10</i>). Par contre, cet arrêt n'est pas un arrêt de sécurité.</p> <p>Selon l'endroit où tombe la pièce, diverses parties du corps peuvent être exposées lors du ramassage.</p>	<p>pénètre dans la zone pour récupérer la pièce.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Port d'un casque pour protéger la tête du travailleur. 		

5.3.2 Intégrateur 1 – Tâche A : analyse du processus d'intégration

L'intégration de l'application « Presse » par l'intégrateur 1 suit une logique itérative plutôt que linéaire et peut se décrire à travers trois grandes phases : 1) conception de l'application future ; 2) montage et programmation de l'application ; 3) validation de la sécurité et de la productivité de l'application (figure 12, a et b). Cette figure synthétise les sections 5.3.2.1 à 5.3.2.3. Comme illustré à la figure 12 par le chevauchement partiel des cercles représentant chacune des phases, celles-ci se sont graduellement succédé au fil du temps, chacune menant à la suivante. Le premier cercle gris (en haut à gauche) et identifié « Demande du client » n'est pas considéré comme une des grandes phases puisqu'elle émane principalement du client (c.-à-d., l'équipe de recherche), mais vient plutôt marquer le début de la démarche des intégrateurs, qui a consisté en une forme d'analyse de la demande, notamment via la consultation du cahier des charges et des échanges avec l'équipe de recherche. Sur la figure 12, le cercle gris prend la même forme dynamique que les autres cercles et chevauche la prochaine phase, puisque pendant la phase de conception de l'application future, des allers-retours vers le cahier des charges ont été nécessaires pour clarifier certains points de la demande avec l'équipe de recherche. Les sections suivantes décrivent chacune des trois grandes phases du processus d'intégration de l'application.

En plus de la dynamique des cercles décrite précédemment, l'encadré ci-dessous explique comment interpréter le schéma du processus d'intégration de l'application « Presse » de l'intégrateur 1. L'explication dans cet encadré est aussi valide pour les trois autres processus d'intégrations décrits dans ce rapport :

Deux colonnes d'informations, séparées par une flèche descendante intitulée : « Recherche d'équilibre entre sécurité et performance » se trouvent à droite des cercles. Les points listés dans ces deux colonnes proviennent de l'analyse des phases du processus d'intégration (en l'occurrence ici, sections 5.3.2.1 à 5.3.2.3). Dans la première colonne, il s'agit de la liste des points de décisions, de réflexions ou de suites envisagées relatives à chaque cercle symbolisant une phase. Ces points, soulevés après lecture de la demande du client, sont regroupés sous un titre de la même couleur que le cercle concerné. La flèche montre la progression de la recherche d'un équilibre entre sécurité et productivité tout au long du processus d'intégration traversant les différentes phases (voir le dégradé de couleurs identiques à celles des cercles). Quant à la dernière colonne droite, elle liste, sous forme synthétique, les préoccupations de l'intégrateur tout au long de la recherche de cet équilibre à chaque phase ; notez encore la correspondance des couleurs du texte avec celles des cercles : gris, rouge, bleu, jaune.

Une lecture des sections d'analyse des phases du processus d'intégration qui suivent chacune de ces figures est encouragée, pour mieux comprendre ou approfondir le contenu de cette figure synthétique.

Figure 12a. Processus d'intégration de l'application « Presse » (Intégrateur 1).

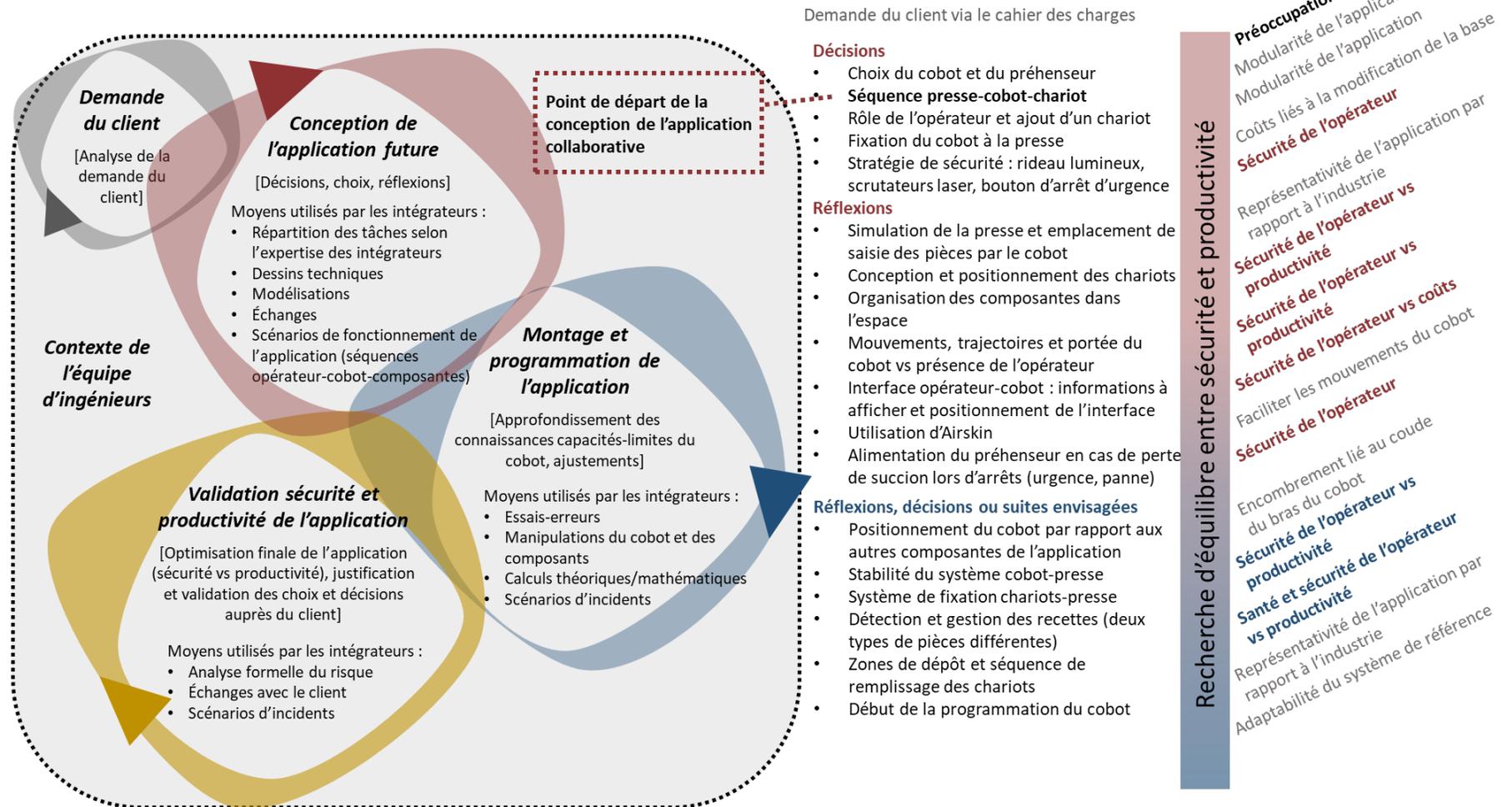
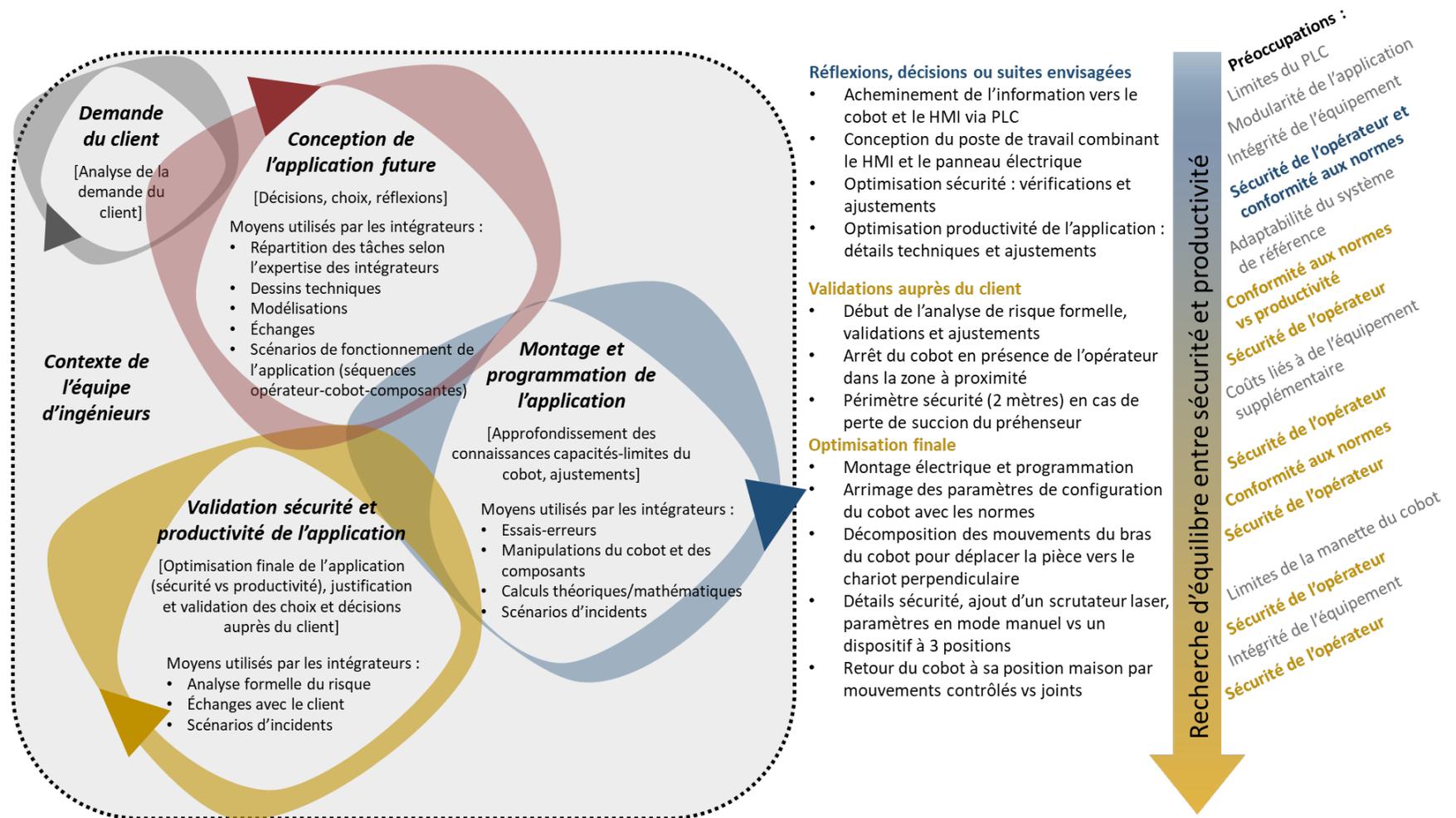


Figure 12b. Processus d'intégration de l'application « Presse » - Suite (Intégrateur 1).



5.3.2.1 Phase 1 : conception de l'application future « Presse » de l'intégrateur 1

Le processus d'intégration de l'application « Presse » a débuté par une courte étape d'analyse de la demande du client. Une fois cette étape franchie, la première grande phase de conception de l'application future s'est enclenchée. Des choix importants d'équipements, notamment du cobot *UR10e* et du préhenseur, ont été faits par l'équipe d'intégration à ce stade très embryonnaire du processus d'intégration. Parmi les raisons évoquées par les intégrateurs pour ces choix, le critère de modularité exigée du client dans son cahier des charges pour l'application semble avoir été une priorité :

« *Suction cup On-robot* », le choix c'est sur le fait qu'il génère son propre « *vaccum* », sans avoir de l'air comprimé externe ou du « *vaccum* » externe. C'est plus facile pour tout ce qui est de la modularité. »

(Compte rendu [CR] 2020-10-06)

Ainsi, un critère provenant du cahier des charges semble avoir pesé dans la balance pour arrêter le choix de la combinaison cobot-préhenseur précisément. Ce critère de modularité a également compté dans le cadre du développement de la séquence de fonctionnement entre la presse et le cobot, plus précisément concernant la détection des pièces :

« La pièce, on va avoir un système qui va la mettre toujours au même endroit parce que la pièce dans une presse est toujours exactement au même endroit. Le plus simple c'est un vérin, mais je ne suis pas fan du vérin parce que l'idée c'est d'avoir un système modulaire et qui dit vérin dit air comprimé. Si vous voulez transporter cette application à des endroits où il n'y a pas d'air, ça va être beaucoup plus compliqué. On va voir pour comment indexer cette pièce et comment la détecter, ça peut être par la gravité. »

(CR 2020-10-06)

Par ailleurs, l'élaboration de divers scénarios possibles d'opérations réalisées par le cobot a contribué à construire progressivement et à stabiliser la représentation de fonctionnement de base de l'application « Presse » :

« On amène la pièce dans la presse, la presse travaille la pièce, donc on va faire des trous, on va la plier et après elle va finir son cycle. On va dire, OK j'ai fini mon cycle, le robot peut venir la chercher. C'est des choses qu'on va devoir simuler. Donc l'approvisionnement de la pièce c'est la première étape, après il y a une étape de travail qui peut juste être un « *timer* ». On peut mettre une lumière à trois couleurs pour dire, quand c'est rouge la pièce est en train de travailler, en vert c'est la fin du cycle de la presse, on peut l'enlever pour indiquer au robot de prendre la pièce et le robot va la poser dans un chariot. »

(CR 2020-10-06)

Cette étape de définition de la séquence d'interaction entre la presse, le cobot et le chariot a semblé constituer le point de départ de la démarche des intégrateurs, l'ensemble

de l'application s'étant par la suite développée autour de cette séquence. Notamment, l'idée d'organiser le travail de l'opérateur autour d'une interaction « interposée » avec le cobot, par l'intermédiaire d'un chariot sur roulettes, est apparue comme la suite logique de la séquence presse-cobot-chariot. De la même façon, la décision de l'ajout d'un deuxième chariot a semblé aller de soi, afin d'avoir un second scénario de variabilité conformément au cahier des charges. La plus-value du deuxième chariot : permettre d'enchaîner avec un nouveau lot de production donc avec une autre taille de pièce si le chariot parallèle est rempli par le lot précédent. Par ailleurs, cette série de choix et de réflexions autour de la séquence d'interaction entre le cobot, les équipements auxiliaires et l'opérateur ont mis l'intégrateur devant un problème de conception important, concernant l'emplacement du deuxième chariot :

« Idéalement ce qu'on préfère c'est le trajet le plus court, quasiment juste de descendre la pièce à la verticale dans le chariot, le temps le plus court, le robot travaille moins, moins de danger parce que je dépose quasiment au sol juste devant lui. C'est ce qui est idéal en termes de danger, c'est beaucoup plus facile en termes d'analyse parce que la zone est restreinte et le robot n'ouvre pas un grand mouvement avec une pièce. Si le robot fait un grand mouvement avec une pièce, la problématique en termes de danger change beaucoup. Si le robot fait une rotation, c'est pas du tout la même chose. Petit mouvement, petite vitesse, petit danger. Si on veut garder la cadence, on doit augmenter la vitesse, c'est de l'énergie. Donc j'ai plus de danger. Des fois on n'a pas de place devant parce qu'on veut que l'opérateur puisse manœuvrer la pièce, à ce moment-là, on dit le robot va poser plus loin. Donc la position idéale du chariot, on ne peut pas l'avoir. »

(CR 2020-10-06)

Il s'agit là d'un enchaînement de choix de conception qui ont été critiqués à plusieurs égards pour la suite du processus, et qui, comme en témoigne ce dernier extrait, ont ouvert la voie à des réflexions sur d'autres aspects en devenir de l'application. Par exemple, l'intégrateur a pu anticiper dès lors que le positionnement perpendiculaire du deuxième chariot allait rendre inévitable une longue trajectoire du bras du cobot pour aller déposer les pièces sur le deuxième chariot. À cet égard, des préoccupations concernant l'augmentation des risques pour la sécurité de l'opérateur et celles vis-à-vis de la productivité de l'application étaient déjà bien perceptibles à travers leurs échanges.

C'est également à l'intérieur de cette phase, donc à un stade plutôt préliminaire du processus d'intégration, que des décisions importantes concernant la stratégie globale de sécurisation de l'application collaborative ont été prises par les intégrateurs. Notamment, ceux-ci ont semblé privilégier l'ajout d'équipements externes au cobot, tel un rideau lumineux afin de sécuriser l'avant de la presse, de même que des scrutateurs laser pour protéger une zone considérée dangereuse pour l'opérateur durant le fonctionnement normal de l'application. Finalement, la transition vers la phase de montage et de programmation de l'application a été marquée par l'émergence d'un enjeu qui allait être revisité par l'intégrateur à quelques reprises jusqu'à la fin du processus, concernant les

risques de projection d'une pièce en cas de perte de succion du préhenseur à ventouses, par exemple lors d'un arrêt d'urgence du cobot. Les préoccupations vis-à-vis de cette problématique autour du préhenseur ont semblé essentiellement liées à la sécurité de l'opérateur.

5.3.2.2 Phase 2 : montage et programmation de l'application « Presse » de l'intégrateur 1

Le fonctionnement général de l'application collaborative et la configuration spatiale du cobot et de ses composantes avaient été définis dans leur ensemble durant la phase précédente. De plus, l'accès au système robotique et aux équipements auxiliaires et leur manipulation physique dans l'environnement de l'application ont mené l'équipe d'ingénieurs à s'ajuster par rapport à la réalité, que ce soit en termes de contraintes d'espace, ou de limites des capacités du système robotique. Tout comme dans le cas de la démarche analysée précédemment, c'est à travers une méthode généralisée d'essais-erreurs que les intégrateurs ont mené à bien l'implantation physique de l'application. Par exemple, le développement du système de fixation visant à stabiliser et à maintenir les chariots dans leurs positions précises a semblé impliquer plusieurs points à considérer par l'équipe d'ingénieurs et de techniciens. Cela s'est traduit dans leur démarche par l'essai de différentes positions via des simulations, dans le but de trouver le meilleur équilibre possible entre la santé et la sécurité de l'opérateur et la productivité de l'application :

« Ingénieur 1 : Oui, en fait ce chariot-là qui est parallèle à la presse, on va le tester en deux positions différentes, une où est-ce que la barrure est à gauche, l'autre où est-ce que la barrure est à droite et on pourrait voir quel serait l'impact sur le temps de cycle et sur le travail de l'opérateur lui-même vis-à-vis de se pencher et serrer le chariot ou pas.

Ingénieur 2 : Concernant le changement de chariot parallèle, on ne peut pas garder la même place que dans cette configuration, juste changer la barre de fixation ? J'imagine que ça ne change pas grand-chose dans le temps de cycle.

Ingénieur 1 : Complètement raison [ingénieur 2], si on garde le chariot à la même place et on change juste la barrure, c'est sûr que ça n'influence pas le temps de cycle. Mais ça peut influencer le temps d'installation du chariot de l'opérateur. »

(CR 2020-10-27)

Le traitement et la gestion au sein de l'application de deux lots de pièces comportant des dimensions différentes ont également entraîné une réflexion comportant divers éléments à prendre en compte dans la perspective de concevoir une application à la fois sécuritaire et performante :

« Ingénieur 1 : Est-ce qu'on met un deuxième capteur pour détecter le type de pièce ou pas ? Actuellement on a deux types de pièces, les courtes et les longues. Si on a un capteur au centre, on va détecter toujours les pièces. Par contre si on met un deuxième capteur, la presse ou le système va être capable de savoir est-ce que

c'est une petite ou une longue pièce parce que ce n'est pas le même mouvement, le programme va être différent avec une grande ou une petite. On met ce type de configuration dans la HMI, dans l'écran on choisit le type de pièce et le robot fait physiquement ce qui a ou est-ce qu'on met un deuxième capteur qui va détecter si c'est une grande ou une petite pièce ? Théoriquement dans une presse normale, c'est la presse qui va dire son numéro de recette au robot ou on part du principe que c'est l'opérateur qui rentre le type de pièce dans la HMI.

Membre de l'équipe de recherche 1 : Est-ce que ça va être plus sécuritaire ?

Ingénieur 1 : Ça serait plus sécuritaire et j'aime bien valider par des capteurs.

Ingénieur 2 : Avec ça on enlèvera la variable « erreur humaine » parce qu'il peut mettre une petite pièce et il rentre une grande pièce dans la recette. C'est sûr qu'une validation par le robot serait faisable, mais habituellement on ne fait pas valider par le robot parce que ça augmente le temps de cycle.

Ingénieur 1 : On ne veut pas que le robot se mette en alarme parce que la pièce n'est pas bonne.

Membre de l'équipe de recherche 2 : Est-ce que la vitesse du robot va changer en fonction de la taille de la pièce ? C'est ça ?

Ingénieur 2 : Ça fait partie de l'analyse de risque, on n'est pas encore rendu là.

Ingénieur 1 : C'est fort probable. »

(CR 2020-10-20)

Ce dernier extrait permet d'apprécier comment des éléments de variabilité à première vue anodins, liés aux critères prescrits dans le cahier des charges, ont eu une incidence importante sur le processus d'intégration de l'application.

De manière similaire au cas analysé précédemment, la fin de la phase de montage et de programmation de l'application a été marquée par une boucle d'optimisation de la sécurité, en même temps que de la productivité de l'application. À cette fin, plusieurs vérifications et ajustements ont été effectués lorsque requis. Notamment, il a été convenu au sein de l'équipe d'ingénieurs de diminuer le plus possible l'espace entre la presse et le chariot, en laissant un espace suffisant pour que l'opérateur puisse manœuvrer le système de fixation du chariot, mais tout en évitant qu'il s'y retrouve coincé.

5.3.2.3 Phase 3 : Validation sécurité et performance de l'application « Presse » de l'intégrateur 1

Marquant la transition vers la dernière grande phase de validation de la sécurité et de la performance de l'application, l'analyse formelle des risques a constitué une étape tardive dans le processus. Cette formalité s'est instaurée notamment lorsque l'intégrateur 1 a jugé qu'un scrutateur laser serait utile et lorsqu'une solution préliminaire assez avancée au niveau des trajectoires était disponible.

Cela dit, tel que le démontre l'analyse du cas de l'intégration de « Presse » jusqu'ici, une diversité de préoccupations concernant la santé et la sécurité de l'opérateur a été prise en considération par l'intégrateur 1 dans leurs réflexions et a influencé leurs choix de conception tout au long du processus, de manière informelle. Par ailleurs, à un certain moment au courant des échanges avec l'équipe de recherche, concernant le problème de maintien de la succion du préhenseur à ventouses, ils expliquent :

« C'est qu'à chaque fois qu'on avance un petit peu, on remarque qu'on va devoir prendre des décisions, puis les décisions habituellement, sont pas tout le temps, mais des fois reliées directement avec l'analyse de risques. C'est sûr qu'on doit devoir créer une *Template* ou un tableau, une façon de faire pour résumer les normes, et je veux dire analyser l'application une fois que ça sera programmée. Tout ça, en utilisant ce tableau-là pour identifier les points, mais au fur et à mesure qu'on avance dans le projet, il y a des décisions qui se prennent en temps et lieu pour l'analyse de risque, par exemple, est-ce qu'on utilise le 24 V externe ou pas. Forcément, on se dit on ne va pas lâcher la pièce, donc déjà, on va prendre un 24 V. On ne va pas attendre jusqu'à l'analyse de risques pour décider si on prend 24 V ou pas. C'est vraiment un travail en continu. Mais plus tard, donc, une fois qu'on va finir le montage *Vention* [la structure métallique], une fois qu'on va finir la programmation, on va passer par une vraie étape d'analyse de risques en suivant un tableau qui sera où est-ce qu'on va faire une appréciation du risque avant, puis ensuite en essayant de le réduire, et ainsi de suite. »

(CR 2020-11-03)

Le tableau 9 illustre ce problème de succion et l'évolution de sa solution.

Tableau 9. Problématique de succion et évolution de la solution

Problématique initiale d'intégration en lien avec la SST		Choix de solution et évolution de la problématique
Gestion de la succion (<i>vacuum</i>) lors des arrêts d'urgence (AU)	<p>Lors de l'activation de l'AU, la pompe s'arrête. L'intégrateur veut garder la succion pour s'assurer que la pièce ne tombe pas lors d'un AU.</p> <p>De manière générale, la gestion de la succion est une source de risque de chute de pièce.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Quand l'AU est activé, la pompe s'arrête, mais les valves se ferment. La succion maintient la pièce. Toutefois, c'est précaire, car si le vide se perd, la pièce tombe. On veut que la pompe reste active pour assurer 60 % de vide. Utilisation d'une source externe pour alimenter les entrées-sorties du système de succion, malgré l'AU activé. L'essai fut concluant.
Pièce avec cambrure	<p>Les pièces de 40 pouces sont courbées, ce qui amène un défi pour la prise (assurer une succion adéquate malgré un léger mouvement de flexion de la pièce) et le dépôt (précision d'une pièce à l'autre).</p>	<ul style="list-style-type: none"> Utiliser la fonction « <i>Move until</i> » (bouger jusqu'à ressentir un contact ou une certaine résistance) et un ajustement de la profondeur après le contact. Ajuster le positionnement des supports qui réceptionnent la pièce dans le chariot, pour

Problématique initiale d'intégration en lien avec la SST		Choix de solution et évolution de la problématique
		que la cambrure soit moins marquée lors du dépôt.
Perte de succion lors d'un déplacement avec la pièce	Vibration des pièces de 60 pouces lors du déplacement. Succion parfois insuffisante.	<ul style="list-style-type: none"> • Ne pas aller trop vite lorsqu'on manipule une pièce, opter pour des trajectoires fluides et arrondies. • Nettoyer régulièrement les ventouses. La présence de poussières influence la qualité de la succion.
Charge utile, succion et changement d'état de variables dans le programme informatique	Erreur dans le programme lors des tests en lien avec le changement de charge utile et en lien avec l'activation ou la désactivation de la succion lors de la prise et du dépôt des pièces.	<ul style="list-style-type: none"> • Forcer et vérifier la bonne valeur des variables dans le programme pour s'assurer que ça fonctionne correctement (p. ex. valve ouverte lorsqu'on remonte après le dépôt) • S'il y a un problème, cela force l'arrêt plutôt que de sauter des étapes du programme ; • Surveiller la perte de succion lors du transport de pièce.

Ainsi, il apparaît qu'au fur et à mesure de l'intégration de l'application, les intégrateurs ont anticipé certains points sensibles concernant les aspects de sécurité de l'application, en faisant appel à leur expérience et aux connaissances qu'ils avaient ou qu'ils ont acquises au fur et à mesure de l'avancement de leur démarche d'intégration. De plus, cette étape plus formelle d'appréciation et de contrôle des risques est nettement caractérisée par des ajustements visant l'optimisation de la sécurité de l'application et un arrimage avec les normes en matière de sécurité des machines, par souci de conformité. La décomposition de la trajectoire du bras du cobot en petites translations et rotations vers « l'intérieur » (rester au plus près de la base du cobot), plutôt qu'une rotation complète vers « l'extérieur » avec le bras étiré, pour aller déposer la pièce vers le chariot perpendiculaire en est un bon exemple :

« Intégrateur : C'est le mouvement après le ramassage d'une pièce vers le deuxième chariot qui est perpendiculaire à la presse au lieu de faire une rotation qui va faire bouger la pièce par-dessous de la zone vide entre la presse et le chariot. On fait un mouvement de l'autre côté, un mouvement beaucoup plus coupé, munie aussi de translation pour venir déposer la pièce dans le chariot sans créer la rotation qui vient par-dessus de la zone où est-ce qu'un opérateur pourrait se mettre. Pour éviter cette zone-là, pour que la pièce ne passe pas par-dessus.

Membre de l'équipe de recherche : C'est pour la sécurité de l'opérateur par rapport aux déplacements du bras ?

Intégrateur : La sécurité de l'opérateur ou éviter de créer un gros moment ou une grande cinétique à la pièce si jamais on perd le "vacuum", comme ça la pièce ne sera pas projetée. »

(CR 2020-12-01)

La création de plans de sécurité a été une solution parmi d'autres pour protéger l'opérateur dans le cas d'un mouvement du cobot vers le chariot perpendiculaire. Cependant, la création de ces plans représentait quelques défis comme le montre le tableau 10.

Tableau 10. Défis des plans de sécurité et évolution de la solution

Problématique initiale d'intégration en lien avec la SST		Choix de solution et évolution de la problématique	Note
Plans de sécurité	Détermination des valeurs angulaires à programmer au niveau des axes pour établir les plans de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • Créer les trajectoires du cobot puis passer à travers le programme pour déterminer la position des plans. • Se garder une marge de manœuvre à cause de la précision du cobot ($\pm 2^\circ$) • Revalider les plans lorsqu'il y a une modification à la trajectoire (p. ex. changement de trajectoire vers le chariot perpendiculaire). 	La détermination des plans est assez fastidieuse et prend du temps. L'intégrateur pense préférable de créer les plans de sécurité une fois les trajectoires déterminées, pour ne pas avoir à refaire le travail.

Ainsi, c'est dans cette perspective d'échanges et de validations avec le client que s'est achevé le processus d'intégration de l'application. Parallèlement, l'équipe d'ingénieurs s'est mobilisée à travers une dernière boucle d'optimisations, surtout concentrée autour de préoccupations touchant la sécurité de l'application.

5.4 Résultats pour la tâche A « Presse » avec l'intégrateur 2

5.4.1 Intégrateur 2 – Tâche A : application collaborative, appréciation et réduction du risque

L'intégrateur 2 pour la tâche A a choisi le cobot UR10e pour l'application A « Presse ». Le pendant d'apprentissage du cobot était le point d'entrée des commandes de l'opérateur. Par manque de temps (en raison du confinement lié à la COVID-19), l'intégrateur n'a pas utilisé de pupitre de commande. À l'aide du préhenseur à ventouse, le cobot récupère chaque plaque métallique sur une presse simulée en membrures d'acier. Ensuite, le cobot dépose la plaque sur l'unique chariot situé à l'avant de la presse. Ainsi, l'intégrateur 2 a choisi un seul type d'élément de variabilité pour son processus : la masse des plaques d'acier définie par leurs différences de taille.

La figure 13 correspond au dessin 3D de la cellule cobotique que l'intégrateur 2 prévoyait installer. Trois images montrent la cellule cobotique mise en œuvre au laboratoire de l'IRSST, pour la tâche A « Presse » (figure 14 à figure 16).

Figure 13. Simulation sur *RoboDK* que l'intégrateur 2 a retenue pour la tâche A (source : rapport de l'intégrateur 2).

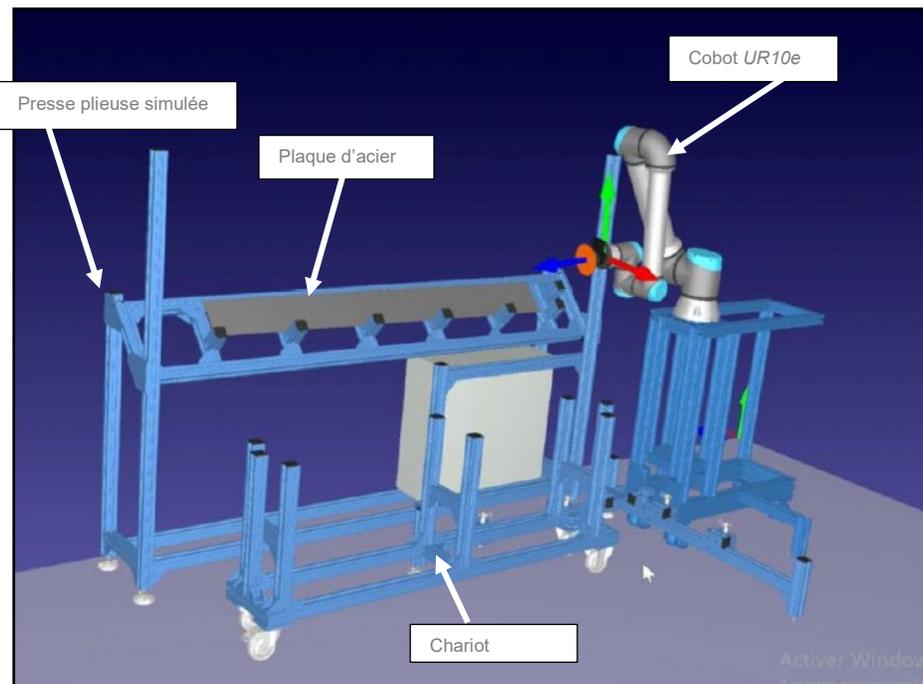


Figure 14. La presse simulée et son chariot pour la récupération de plaques d'acier (source : rapport de l'intégrateur 2).

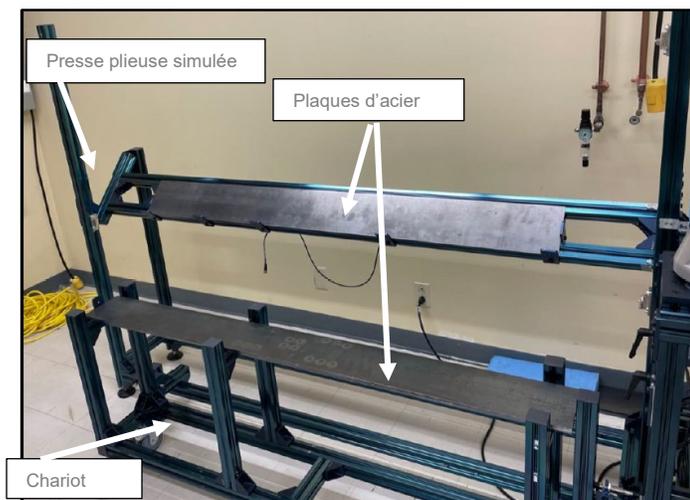


Figure 15. Agencement des composantes de la cellule cobotique de la tâche A pour l'intégrateur 2 et zones protégées associées au scrutateur laser – zones non à l'échelle (source : rapport de l'intégrateur 2).

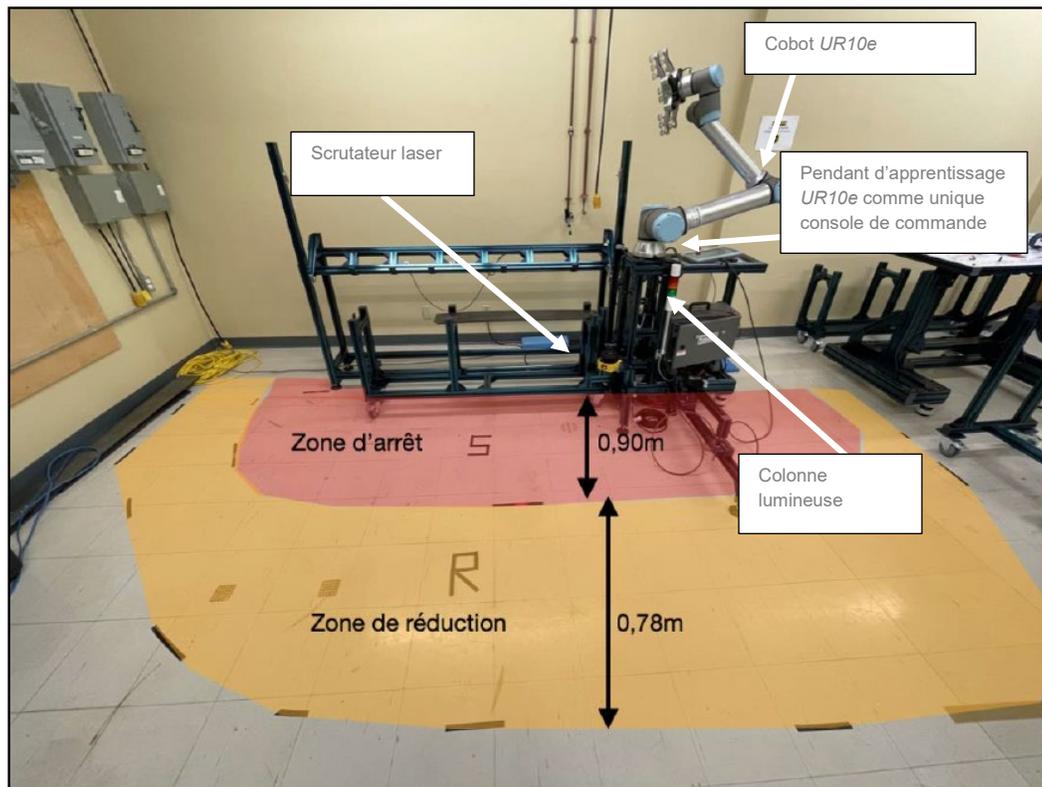
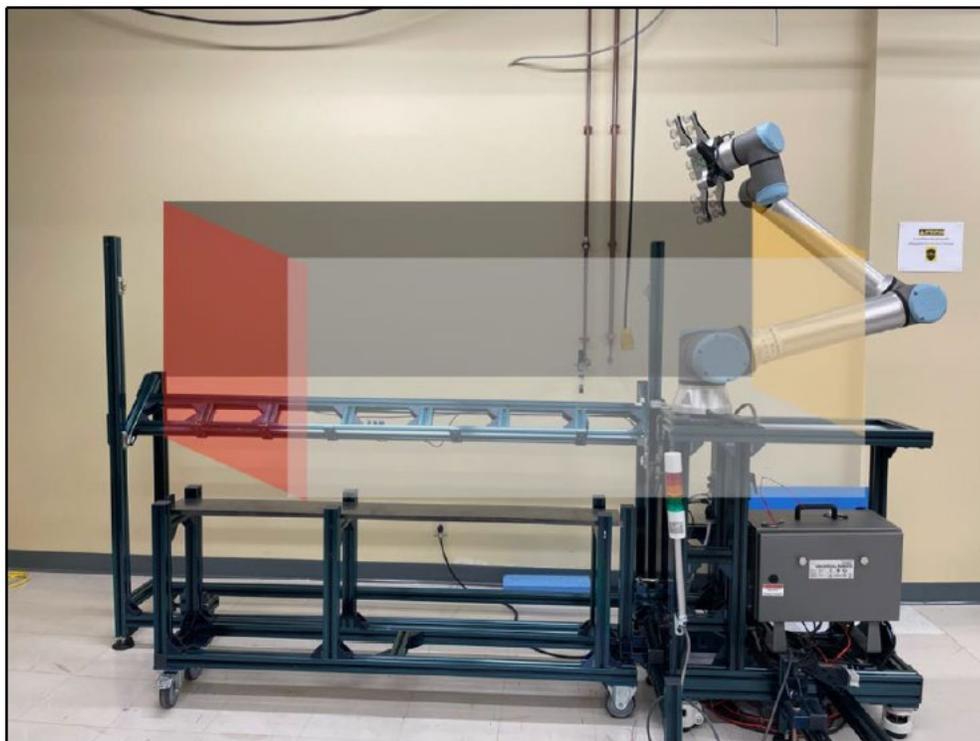


Figure 16. Agencement des composantes de la cellule cobotique de la tâche A pour l'intégrateur 2 et plans de sécurité virtuels programmés dans l'environnement « UR » (source : rapport de l'intégrateur 2).



Le tableau 11 résume l'analyse et la réduction des risques par l'intégrateur 2 pour la tâche A. Les dommages associés aux phénomènes dangereux identifiés sont les suivants : contusion, traumatisme sévère irréversible, fracture, coupure, effets psychophysiologiques, légère brûlure électrique, légère électrisation ou pincement. Ce tableau présente aussi l'estimation des risques initiaux (sans mesure de réduction) et résiduels (avec mesures). Le niveau « 0/10 » correspond au niveau de risque le plus faible en adéquation avec la structure de l'outil d'estimation du risque utilisé (outil différent de celui de l'intégrateur 1), tandis que « 10/10 », au niveau de risque le plus élevé.

Tableau 11. Synthèse du travail d'analyse des risques et de réduction des risques remis par l'intégrateur 2 pour la « Presse »

No	Phénomène dangereux ou événement dangereux identifiés et explications	Mesure de réduction du risque	Risque		
			Initial	Résiduel	
<i>Intégration</i>					
1	Mouvement du bras du cobot	Mouvement imprévisible lors de la mise sous tension	<ul style="list-style-type: none"> Autant que possible, se tenir à distance du cobot Garder une main proche du bouton d'arrêt d'urgence 	4/10	0/10
2		Mouvement non désiré du cobot	<ul style="list-style-type: none"> Idem que ligne 1 Faire les tests en vitesse réduite 	4/10	1/10
3	Élément du cobot sous tension	Entrée en contact avec l'élément sous tension	<ul style="list-style-type: none"> Mettre le cobot hors tension 	1/10	0/10
4	Chute du cobot	Basculement du cobot	<ul style="list-style-type: none"> Vérifier le serrage des vis de manière quotidienne ou hebdomadaire Sceller les vis à l'aide de peinture comme témoin 	7/10	1/10
<i>Fonctionnement</i>					
5	Chute du bras du cobot (perte de puissance)	Coupure d'électricité alors qu'un opérateur effectue un changement de chariot.	<ul style="list-style-type: none"> Arrêt de catégorie 0 permettant un arrêt sécuritaire 	5/10	0/10
6	Mouvement du bras du cobot	Cadence du cobot trop élevée entraînant du stress et un risque de collision	<ul style="list-style-type: none"> Étude d'analyse d'un temps de cycle convenable lors de l'intégration ou mettre en pause la cellule à l'aide du pendant d'apprentissage (<i>teach pendant</i>) 	2/10	1/10
7		Collègue venant parler à l'opérateur (distraction)	<ul style="list-style-type: none"> Avec le scrutateur laser, mettre en pause le cycle pour éviter toute situation dangereuse 	2/10	1/10
8		Mouvement dangereux du cobot provoqué par le changement des réglages (opérateur changeant les réglages, la vitesse, les trajectoires du cobot)	<ul style="list-style-type: none"> Exiger un mot de passe pour accéder aux réglages du cobot 	6/10	1/10
9					

No	Phénomène dangereux ou événement dangereux identifiés et explications		Mesure de réduction du risque	Risque	
				Initial	Résiduel
10		Défaillance du préhenseur entraînant la chute de la plaque	<ul style="list-style-type: none"> Maintenance préventive des équipements Réduction de la vitesse et de la force du cobot en production 	2/10	1/10
11		Opérateur heurté	<ul style="list-style-type: none"> Avec le scrutateur laser, mettre en pause le cycle pour éviter toute situation dangereuse et ajouter des plans de sécurité virtuels 	1/10	0/10
12		Mouvement non désiré du cobot	<ul style="list-style-type: none"> Garder une main proche du bouton d'arrêt d'urgence Réduction de la vitesse et de la force du cobot en production Ajouter des plans de sécurité virtuels 	2/10	0/10
13	Mouvement de pièce pointue	Opérateur heurté	<ul style="list-style-type: none"> Idem que ligne 12 	6/10	0/10
14	Presse en fonctionnement	Éjection de pièce par la presse	<ul style="list-style-type: none"> Formation Arrêter l'ensemble de la cellule 	1/10	0/10
15	Structure de l'installation (collision)	Chute de l'opérateur lié à un trébuchement avec la structure	<ul style="list-style-type: none"> Signalisation Mesure organisationnelle Marquage de la zone de travail 	0/10	0/10
16	Chute de la pièce (perte de puissance)	Opérateur heurté	<ul style="list-style-type: none"> En cas de coupure d'électricité, la plaque peut se détacher après quelques secondes. Il est nécessaire de ne pas s'approcher du cobot Port d'EPI 	6/10	0/10
<i>Maintenance</i>					
17	Cobot sous tension	Mouvement imprévisible du cobot	<ul style="list-style-type: none"> Mise hors tension du cobot avant d'intervenir pour une opération de maintenance 	2/10	1/10
18	Élément du cobot sous tension	Entrée en contact avec l'élément sous tension	<ul style="list-style-type: none"> Idem que ligne 17 	1/10	0/10

5.4.2 Intégrateur 2 – Tâche A : analyse du processus d'intégration de l'application « Presse »

L'analyse de l'intégration de l'application « Presse » par l'intégrateur 2 a permis de dégager une structure d'ensemble propre à sa démarche et d'identifier les moyens utilisés par ce dernier pour concevoir son application. À cet égard, une approche centrée sur la sécurité, c'est-à-dire où la sécurité de l'application est réfléchi de manière systématique, a été privilégiée dans ce cas. Cela s'est traduit par une prise en compte fortement marquée de la sécurité de l'opérateur tout au long du processus d'intégration de l'application. De ce fait, la démarche de cet intégrateur semble avoir plutôt évolué à travers deux grandes phases se succédant et intégrant chacune la sécurité de l'opérateur dans le continuum du processus. La première grande phase, caractérisée par la conception de l'application via le logiciel de simulation RoboDK notamment, a été nommée « Conception de l'application future et analyse de risques », alors que la deuxième phase, caractérisée par l'implantation physique de l'application, a été identifiée comme « Montage et programmation de l'application et poursuite de l'analyse de risques » (figure 17, a et b).

Comme pour l'intégrateur 1, une étape d'analyse de la demande a été réalisée en amont de la phase de conception de l'application future. D'une part, elle s'est articulée à travers plusieurs échanges entre l'intégrateur et les membres de l'équipe de recherche, dont certains assuraient aussi son encadrement et sa formation dans le domaine de la sécurité des machines. Ce contexte particulier apparaît important à prendre en considération parmi l'ensemble de facteurs ayant pu l'influencer dans son approche en matière de sécurisation de l'application.

5.4.2.1 Phase 1 : conception de l'application future et analyse de risques

Marquant son entrée dans la phase de conception de l'application future, le choix du cobot *UR10e* par l'intégrateur semble avoir été basé sur plusieurs motifs évoqués par ce dernier et concernant à la fois la sécurité de l'opérateur et la productivité de l'application :

« Intégrateur : Et puis la chose qui me faisait vraiment passer sur l'*UR10e*, c'était aussi la possibilité de mettre le "Airskin" [peau sensible faisant office de dispositif de protection] et qu'on n'a pas sur l'*Omron*. C'était vraiment ça. Après il y a tous les facteurs, voilà financiers puis productivité et puis ça empêche certains mouvements d'être faits avec cette production. Du coup, je parlais là-dessus parce que je trouvais que c'était, j'avais plus de possibilités pour la suite [...] C'est vrai qu'il y avait beaucoup plus de documentation et en fait en suivant une formation, ils expliquaient comment brancher directement les supports de sécurité comme les lasers ou... comment ça s'appelle, les modules là qu'on met au sol qui permettent de détecter du mouvement et du coup, à partir de ça, on peut choisir plusieurs cas pour savoir si on arrête le robot, si on le ralentit, etc.

Membre de l'équipe de recherche : Au fait c'est qu'il y a plus de soutien technique, je pense, avec l'*UR* et...

Intégrateur : Oui. » (CR 2020-10-28)

Figure 17a. Processus d'intégration de l'application « Presse » (Intégrateur 2).

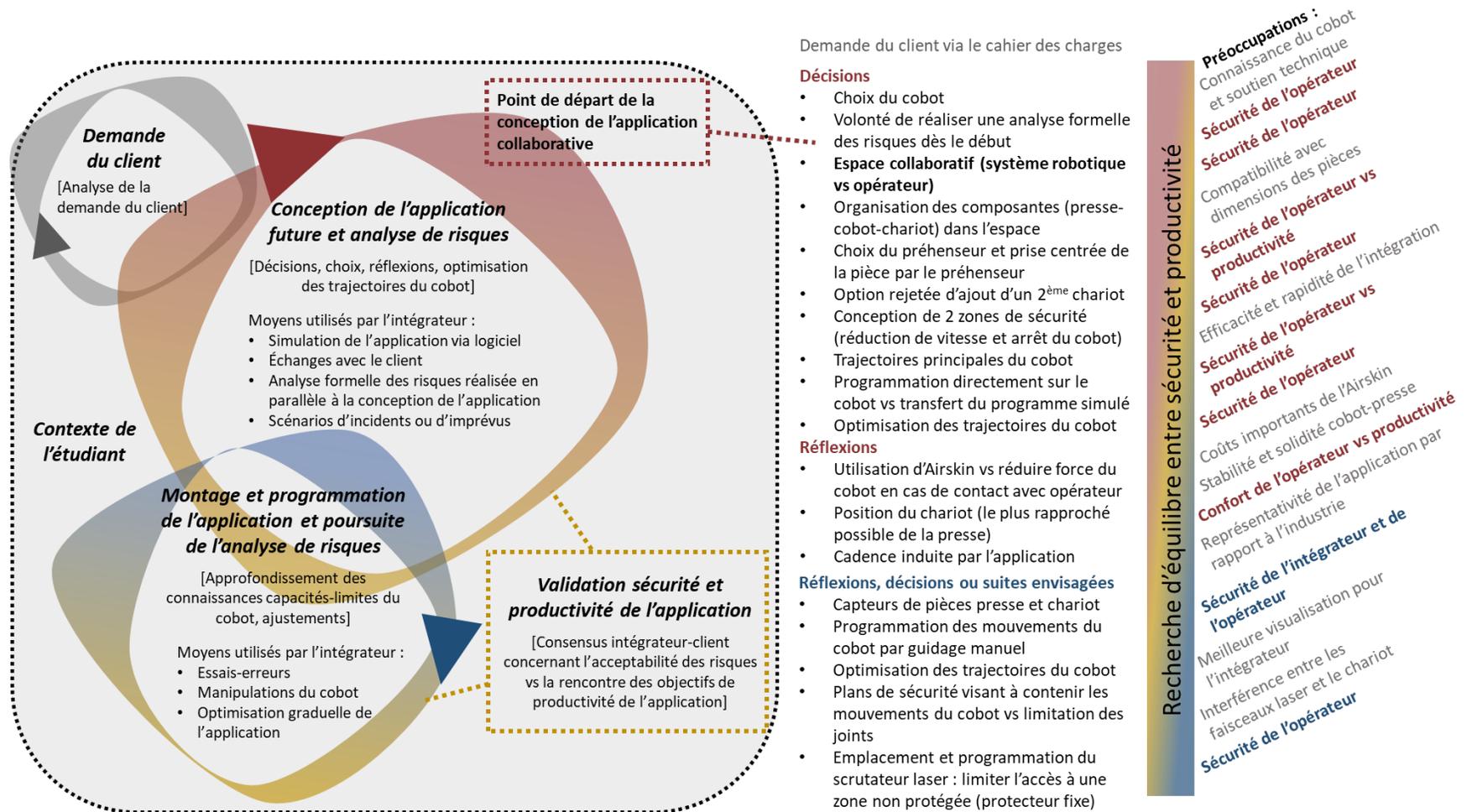
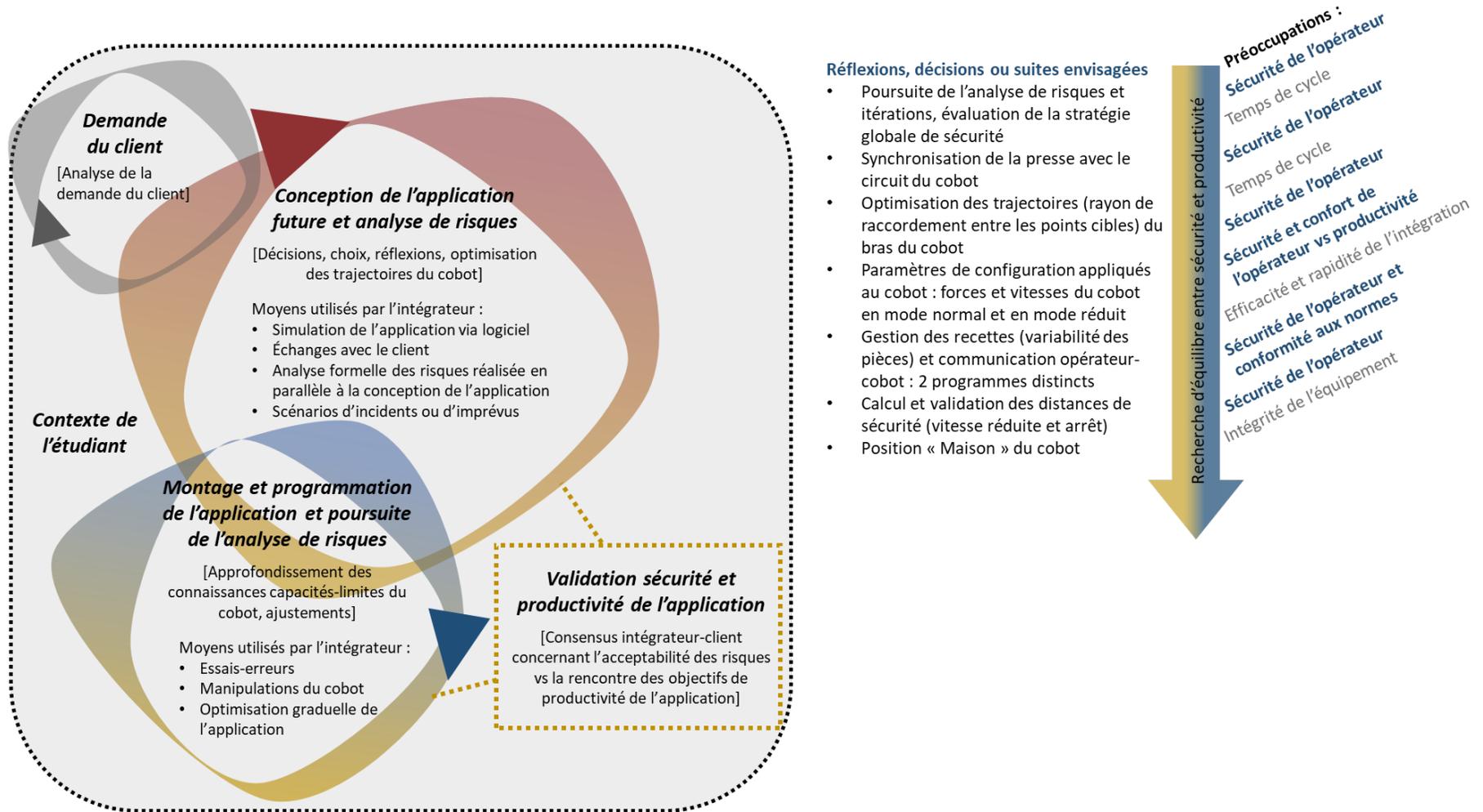


Figure 17b. Processus d'intégration de l'application « Presse » - suite (Intégrateur 2).



Ainsi, il apparaît que la possibilité pour l'intégrateur de se référer aux connaissances déjà acquises dans le cadre d'une formation relative à la sécurisation du cobot et l'assurance de pouvoir se fier à un bon soutien technique du fournisseur au besoin l'ont influencé dans sa décision de privilégier le cobot *UR10e* pour cette application.

Comme évoqué précédemment, une préoccupation centrale visant la sécurité de l'opérateur a caractérisé tout le processus d'intégration de l'application et celle-ci s'est fait sentir dès les balbutiements de sa conception. En passant tout d'abord par cette étape, l'intégrateur 2 souhaitait s'éviter autant que possible des itérations dans le futur, qui seraient liées à des enjeux de sécurité non pris en considération au préalable :

« Je compte d'abord commencer l'appréciation des risques. Ensuite passer à la simulation pour éviter de me retrouver à refaire des bouts parce que je ne l'aurais pas considéré dans l'appréciation des risques. Après, je verrai si c'est la bonne solution ou pas. »

(CR 2020-10-14)

Son défi premier pour l'appréciation des risques résidait dans l'identification, puis l'estimation des risques (tableau 12).

Tableau 12. Défi de l'analyse de risques et évolution de la solution

Problématique initiale d'intégration en lien avec la SST		Choix de solution et évolution de la problématique
Phénomènes dangereux et situations dangereuses	Difficulté à les identifier et à les nommer, car difficulté à les anticiper et à se projeter	Plusieurs échanges avec l'équipe de recherche Consultations de documents sur le sujet (p. ex. http://www.irsst.qc.ca/media/documents/pubirsst/machdangereuses.pdf)
Attribution des valeurs aux paramètres des risques	Comment attribuer les valeurs sachant que les conditions d'utilisation du cobot sont variables (p. ex. vitesse variable)	Il exploite l'expertise de membres de l'équipe sur le sujet (p. ex. un membre de l'équipe lui suggère d'anticiper les situations les plus défavorables d'un phénomène dangereux, mais tout en restant réaliste.)

Parmi les moyens utilisés pour concevoir l'application, la simulation par le biais d'un logiciel spécialisé, « *RoboDK* », a constitué l'outil de prédilection de l'intégrateur 2. La simulation virtuelle a permis à ce dernier de visualiser et par le fait même, de concevoir numériquement l'application dans sa globalité, de manière assez convenable. Notamment, elle a facilité l'organisation des composantes (presse-cobot-chariot) dans l'espace, en même temps que la définition de l'espace collaboratif du système robotique (cobot et préhenseur) et de l'opérateur, en s'appuyant, entre autres, sur des scénarios d'activité future probable de l'opérateur. Ce choix marque le point de départ de la conception de l'application collaborative. La simulation semble aussi avoir favorisé la prise en compte de la sécurité de l'opérateur et alimenté les réflexions vis-à-vis de ces choix de conception importants :

« Oui, en commençant du coup à placer les objets dans mon logiciel de simulation, “RoboDK”, j’ai pu voir du coup où l’opérateur va se placer pour faire son travail collaboratif et là j’essaye au maximum que l’opérateur soit clairement hors champ du robot et qu’il n’ait pas à frôler on va dire le robot et son outil [robotique]. Donc qu’il soit de manière sécurisée par rapport au robot et du coup, c’est comme ça que j’ai élaboré. »

(CR 2020-11-23)

C’est dans cette perspective de conception de l’application future par simulation, réalisée conjointement à l’analyse de risques, que le processus d’intégration a pu évoluer jusqu’à un stade d’avancement important. Du point de vue de la sécurisation de l’application, cela s’est traduit par l’élaboration plutôt aboutie d’une stratégie de sécurité basée sur la protection de l’opérateur grâce à deux zones de sécurité associées au scrutateur laser : l’une de réduction de vitesse du bras cobotisé à une certaine distance d’approche de ce dernier par l’opérateur (zone orangée de la figure 15) et l’autre d’arrêt du bras cobotisé, à proximité directe de l’opérateur avec celui-ci (zone rouge de la figure 15). Le calcul des distances de sécurité associées à ces zones et l’estimation du niveau de performance requis du scrutateur laser ont représenté un apprentissage utile pour l’intégrateur 2 (tableau 13).

Tableau 13. Défis relatifs au scrutateur laser et évolution de la solution

Problématique initiale d’intégration en lien avec la SST	Choix de solution et évolution de la problématique
Calcul des distances de sécurité associées au scrutateur laser	<ul style="list-style-type: none"> • D’abord, l’intégrateur 2 a déterminé les distances au ressenti, en se basant uniquement sur la longueur de son bras. • Ensuite, conseillé par sa codirectrice de recherche, il a calculé les distances à partir de la norme ISO 13855 (ISO, 2010b). La distance trouvée est trop importante et va à l’encontre d’une collaboration et contribuera à des arrêts indésirables de la production. Alors, réduction de cette distance en considérant les moyens de prévention intrinsèques au cobot : utilisation d’un plan de sécurité virtuel, vitesse réduite de 160 mm/s (la vitesse normale de production est de 1500 mm/s), force maximale de 150 N à 120 N en mode réduit. C’est ainsi qu’il arrive aux distances suivantes : <ul style="list-style-type: none"> ○ zone d’arrêt : 0,90 m ; ○ zone de réduction de vitesse : 0,78 m.
Détermination du niveau de performance requis (PL _r) pour le scrutateur laser, afin qu’il réduise les risques concernés à un niveau acceptable	<ul style="list-style-type: none"> • L’intégrateur 2 détermine le PL_r avec l’outil d’estimation de PL de l’ISO 13849-1 (ISO, 2015), mais il réalise vite qu’on ne peut l’utiliser pour déterminer les niveaux de risques. • Il élabore son propre outil d’estimation du risque, mais sa codirectrice lui fait réaliser que celui-ci doit respecter des règles (p. ex. les règles de Chinniah <i>et al.</i> [2011]) • Suggéré par un membre de l’équipe de recherche, l’intégrateur 2 lit le rapport R-697 de l’IRSST (Chinniah <i>et al.</i>, 2011) pour se renseigner sur les critères d’un outil d’estimation du risque adéquat

Problématique initiale d'intégration en lien avec la SST	Choix de solution et évolution de la problématique
	<p>et y découvre des exemples d'outils. Il réalise que l'outil de l'ISO 13849-1 (ISO, 2015) a un biais en raison de son nombre de niveaux de gravité du dommage qui est inférieur à trois.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Il réfléchit à comment passer d'un outil de détermination d'un PLr à un outil d'estimation du risque le moins biaisé possible. • Il lit le rapport R-697 de l'IRSST pour déduire comment faire cette correspondance. • À la lumière de ces recherches, il trouve sur l'internet la version à jour d'un outil identifié dans le R-697. Cet outil répondant aux règles de Chinniah <i>et al.</i> (2011) permet, à la fois, d'estimer le risque et de déterminer le PLr. C'est l'outil <i>SCRAM</i> de Sick.

Sur le plan de l'avancement de l'application en tant que telle, la simulation a permis d'aller jusqu'à définir les trajectoires du bras du cobot et même de passer à travers une première boucle d'optimisation de ces trajectoires, dans l'optique d'atteindre le meilleur équilibre possible entre la productivité de l'application et la sécurité de l'opérateur.

Parallèlement à cet avancement important du processus d'intégration, caractérisé par des choix de conception majeurs effectués par le biais du développement totalement simulé de l'application, quelques réflexions qui allaient mener à des décisions ultérieures ont été entamées par l'intégrateur à ce stade. Par exemple, celui-ci a commencé à réfléchir à une façon de rendre plus sécuritaire l'application de manière intrinsèque au cobot, en réduisant les paramètres de force à appliquer à son bras :

« Bah j'ai rien décidé de, on va dire de fixe. Cependant je pensais aussi, c'est vrai que je ne l'ai pas intégré là, ça m'est venu après, une réduction de... je crois que c'est possible normalement de réduire la force du robot. Du coup, en cas de contact, le robot va, en fonction de la force qu'on va lui dire, en cas de contact s'il a pas insisté sur le contact, il va s'arrêter plus facilement, du coup peut-être une réduction de force aussi, ça serait envisageable pour réduire le risque. Je pense à ça. Après il y avait aussi l'idée de Airskin mais ça, je pense, je sais pas s'il faut que j'y pense tout de suite ou il faut que j'élabore d'abord peut-être un budget pour savoir si ça peut entrer en compte dans une intégration. Comme c'est un module qui coûte apparemment assez cher. »

(CR 2020-11-23)

Au tout début de la démarche, la possibilité d'utiliser la technologie « *Airskin* » semble avoir pesé dans l'équation pour le choix du cobot *UR10e*. Toutefois, l'intégrateur 2 a envisagé une autre alternative après avoir été informé des coûts substantiels liés à cette technologie et du fait que les bords tranchants des plaques d'acier risquaient de perforer cette peau sensible et la rendre ainsi défectueuse. Puis, toujours à l'intérieur de cette grande boucle de conception de l'application future, s'est amorcée une autre réflexion chez l'intégrateur, par rapport au rythme de production de l'application. Il est intéressant

de constater qu'une préoccupation concernant le confort de l'opérateur a entraîné un questionnement sur la possibilité que l'opérateur puisse avoir un certain contrôle sur la cadence, en s'appuyant ici aussi sur un scénario d'activité future probable :

« Intégrateur : Moi, je voyais ça comme l'opérateur pourrait choisir un mode plus lent depuis le "*teach pendant*", mais qui reste acceptable pour la production. Donc si vraiment il a besoin de faire une pause en cas de..., il pourrait directement faire pause sur le "*teach pendant*" pour stopper la tâche en cours, s'il n'arrive pas à suivre la cadence.

Membre de l'équipe de recherche : Pour faire ça, il faut que l'opérateur ait le code qui permet de changer la configuration en mode réduit du robot. Normalement, pour des raisons de sécurité, il faut avoir une personne assignée à ce genre de tâche, c.-à-d. configuration du robot, changer les paramètres. Aussi, ce n'est pas évident. Il faut que l'opérateur ait une idée de comment programmer le robot. Il faudrait donc que ça soit quelque chose d'automatique ou une autre solution.

Intégrateur : Sinon, déterminer un cycle qui permet une production adéquate puis que l'opérateur ne soit pas surpassé par les tâches. Ce serait de déterminer un cycle optimal pour à la fois la production et pour l'opérateur. »

(CR 2021-02-04)

5.4.2.2 Phase 2 : montage et programmation de l'application et poursuite de l'analyse de risques

Alors que l'intégrateur 2 a eu accès à l'environnement et à l'équipement pour réaliser le montage physique de son application (p. ex. il a récupéré la presse simulée et le chariot conçus par l'intégrateur 1), le fonctionnement général de celle-ci, la disposition des composantes dans l'espace, les trajectoires qu'allait emprunter le bras cobotisé pour effectuer le déchargement de la presse et la stratégie globale de sécurité entourant l'application avaient déjà été déterminés. Ainsi, le travail de l'intégrateur 2 dans le cadre de la phase de montage et de programmation de l'application a consisté essentiellement à reproduire physiquement l'application, telle que conçue au préalable grâce à la simulation assistée par ordinateur. De plus, cette phase s'est inscrite dans la continuité de la précédente du point de vue de la sécurisation de l'application, alors que l'analyse de risques s'est poursuivie en parallèle de l'implantation de « Presse ». En ce sens, les échanges réguliers entre l'intégrateur 2 et le client se sont également poursuivis, dans la perspective d'un consensus concernant l'acceptabilité des risques pour l'opérateur, versus la rencontre des objectifs de productivité de l'application (encadré en pointillé jaune, figure 17a).

La première étape de cette grande phase a consisté pour l'intégrateur 2 à se familiariser avec le fonctionnement réel du cobot et par le fait même, à approfondir sa connaissance de ses capacités et limites. Pour ce faire, il a notamment procédé par guidage manuel du bras cobotisé et en programmant de courtes boucles de déchargement de pièces. Cela l'a mené à réaliser la nécessité pour le cobot de recevoir des informations relatives à la

présence de pièces provenant de la presse et à la présence d'un chariot pour amorcer le cycle d'opérations. Dans le souci de se rapprocher de la réalité d'une application qui serait utilisée en industrie et de sécuriser le déchargement des pièces dans le chariot, le choix de l'ajout de capteurs a semblé s'imposer, sachant d'autant plus qu'il en avait à sa disposition :

« Bien ça s'est fait que je faisais mes tests, mes boucles de programmation et après je me suis dit qu'est-ce que je pourrais faire pour améliorer tout ça sachant que j'avais ces capteurs à disposition. Donc c'est sûr que d'avoir ces capteurs à disposition, ça m'a inspiré. Du coup je me suis dit ça pourrait être bien d'avoir quelque chose de plus réel en en mettant sur la presse déjà pour savoir si oui ou non, il y a des plaques. Et je me suis dit aussi, comme dans mon analyse de risques il y avait un endroit où il y avait un risque, c'était que le chariot soit mal placé ou qu'il y soit pas et que du coup qu'il y ait des plaques qui tombent sans raison, je me suis dit en ajoutant le capteur pour savoir si le chariot était présent ou pas c'était aussi intéressant. »

(CR 2021-02-23)

En plus d'avancer dans sa compréhension du fonctionnement du cobot, par sa manipulation dans l'espace et à travers des boucles d'essais-erreurs de programmation, il est intéressant aussi de comprendre comment la propre exposition de l'intégrateur au cobot semble l'avoir sensibilisé sur des aspects que ne permettait pas la simulation, l'amenant à ajuster sa façon de travailler à proximité du cobot :

« [...] je connais pas trop le robot de base. J'en ai jamais utilisé. C'est ça que là on s'aperçoit que c'est quand même assez gros, ça peut être assez... ben c'est dangereux comparé à de la simulation. Si on se trompe, il se passe pas grand-chose dans la simulation alors que là si je fais des bêtises, ça peut vite casser des choses ou quoi, du coup j'y suis allé beaucoup... enfin, petit à petit, qu'en simulation avec des faibles vitesses. Au début des mouvements assez simples puis après, j'ai mis des mouvements plus complexes et plus rapides. Donc je pense c'est surtout le fait de savoir que c'est la réalité, c'est plus de la simulation et qu'il faut faire attention et du coup, on prend beaucoup plus de précautions et on fait davantage des tests avant d'avoir quelque chose de fonctionnel. »

(CR 2021-02-23)

Cela porte à croire que son expérience d'interaction réelle avec le cobot l'a influencé dans l'avancement de l'implantation, au fil des différentes boucles d'optimisation de productivité et de sécurité de l'application qui ont caractérisé le travail de l'intégrateur à ce stade et jusqu'à la fin du processus. C'est dans cette perspective alternant l'amélioration de la productivité de l'application, l'optimisation des mesures de sécurité l'encadrant et la validation des décisions prises par l'intégrateur au fur et à mesure des échanges avec ses professeurs et les membres de l'équipe de recherche, que la démarche d'intégration a suivi son cours jusqu'à revoir, à la toute fin, la position « Maison » (« *Home* ») du cobot :

« Je l'ai remis comme ça parce que, en bas du chariot on a une attache, et pour que l'opérateur puisse venir détacher le chariot, à tous les coups il se taperait la tête dans le robot et du coup je l'ai remis en sorte que debout, au plus proche du chariot, on ne puisse pas se cogner sur le robot. »

(CR 2021-03-16)

5.5 Résultats pour la tâche B « Moteur » avec l'intégrateur 1

5.5.1 Intégrateur 1 – Tâche B : application collaborative, appréciation et réduction du risque

Pour l'application « Moteur » de l'intégrateur 1, celui-ci a choisi le cobot *Sawyer* en raison du fait qu'il était déjà familier avec ce cobot ; cela lui ferait gagner du temps en optant pour un cobot qu'il savait déjà programmer. De plus, le fait que ce cobot soit très « mou », il était considéré plus sécuritaire que l'autre cobot disponible pour cette application qui requiert une certaine proximité avec le cobot en mouvement. Dans cette application, le cobot saisit une vis noire ou grise, de longueurs différentes, l'enduit d'une pâte en faisant pivoter la vis sur la partie spongieuse d'un distributeur, puis la présente à l'opérateur. Celui-ci appuie sur la tête de la vis. La force exercée commande l'ouverture des doigts de la pince. Ainsi, l'opérateur la récupère puis l'installe sur le moteur simulé. Par la suite, le cobot retourne sans pièce vers l'une des deux matrices de vis (figure 18, figure 19) pour recommencer la séquence. Comme le montrent ces deux figures, l'intégrateur 1 a usiné, à des profondeurs différentes, les orifices des matrices de sorte que le cobot puisse toujours saisir la vis à la même hauteur. Cette astuce a facilité la programmation de l'opération de saisie de vis par le cobot.

La zone de saisie d'une vis, sa masse et sa géométrie sont les éléments de variabilité exploités dans ce cas.

Figure 18. Profondeur des orifices de la matrice des vis noires conçue par l'intégrateur 1 (source : rapport de l'intégrateur 1).

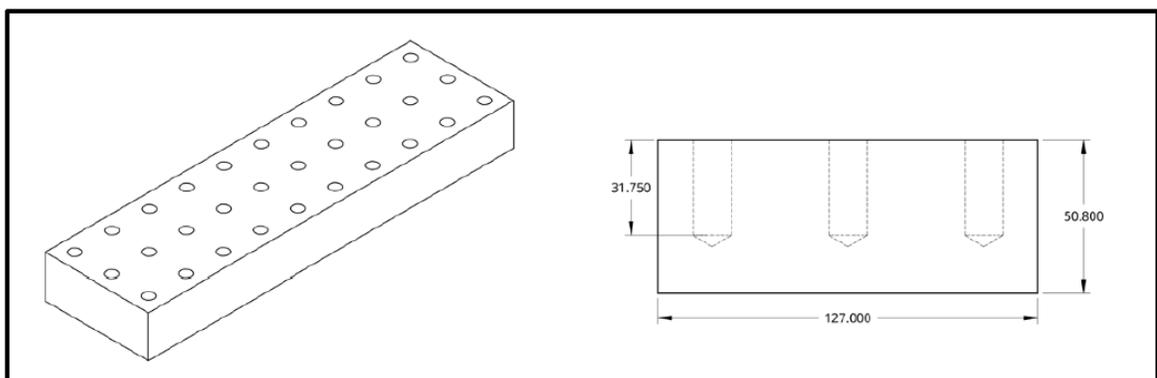
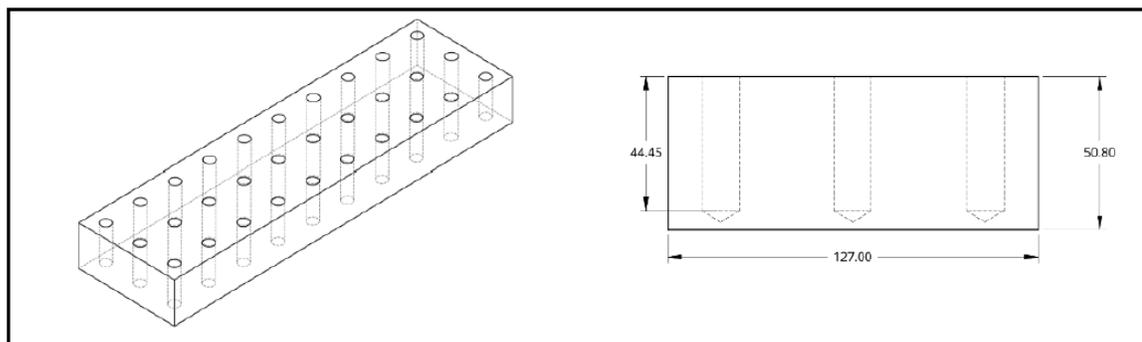
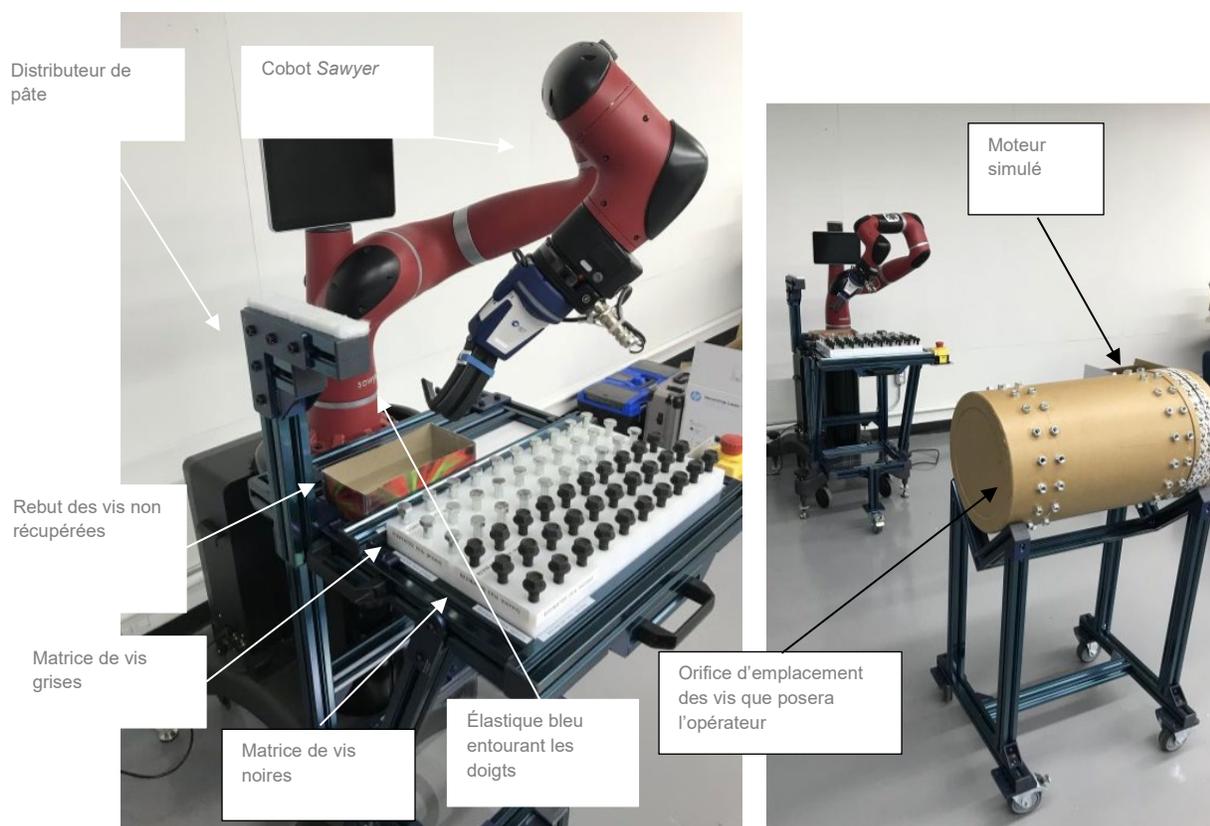


Figure 19. Profondeur des orifices de la matrice des vis grises conçue par l'intégrateur 1 (source : rapport de l'intégrateur 1).



La figure 20 illustre l'agencement des composantes par l'intégrateur 1 pour réaliser la tâche B.

Figure 20. Agencement des composantes dans la cellule cobotique de la tâche B par l'intégrateur 1 (source : rapport de l'intégrateur 1).



Le tableau 14 présente les phénomènes dangereux identifiés par l'intégrateur 1 pour la tâche B ainsi que les mesures de réduction du risque associées (avec le même outil d'estimation du risque que pour la tâche A). Les dommages possibles associés aux

phénomènes dangereux identifiés sont les suivants : choc, écrasement, friction, dommages aux yeux et sur la peau, lacération, petites coupures ou pincement. Les risques initiaux prioritaires selon l'intégrateur 1 sont les risques d'impact avec le bras du cobot, de coincement entre le bras et le moteur ainsi que la projection de pâte ou d'une vis au niveau de la tête de l'opérateur.

Globalement, la conception du cobot *Sawyer* avec des articulations élastiques, non bloquantes et des angles arrondis permet de gérer les risques d'impact et de coincement liés au cobot. Un travail au niveau des trajectoires a également été effectué pour s'éloigner de la tête de l'opérateur. La table avec les vis a été placée entre le cobot et l'opérateur. Aussi, la force du préhenseur réglée au minimum et l'utilisation de l'élastique bleu autour des doigts du préhenseur (figure 20), pour augmenter la capacité de prise des doigts de la pince, permettent de gérer les risques liés au préhenseur et à la projection d'une vis. L'utilisation de la table pour améliorer la stabilité, le port d'EPI (lunettes, gants, bottes et vêtements longs) notamment pour les contacts avec la pâte, le positionnement du moteur et la formation de l'opérateur viennent compléter les mesures de réduction du risque. L'intégrateur considère avoir réduit les risques à un niveau acceptable (2/4 et moins) si les mesures décrites sont appliquées.

On notera que cette application ne nécessite pas de dispositif de sécurité externe au cobot selon l'intégrateur 1. Une partie des risques vient d'éléments autres que le cobot à savoir la pâte, les accessoires et équipements qui créent des zones de coincement.

5.5.2 Intégrateur 1 – Tâche B « Moteur » : analyse du processus d'intégration

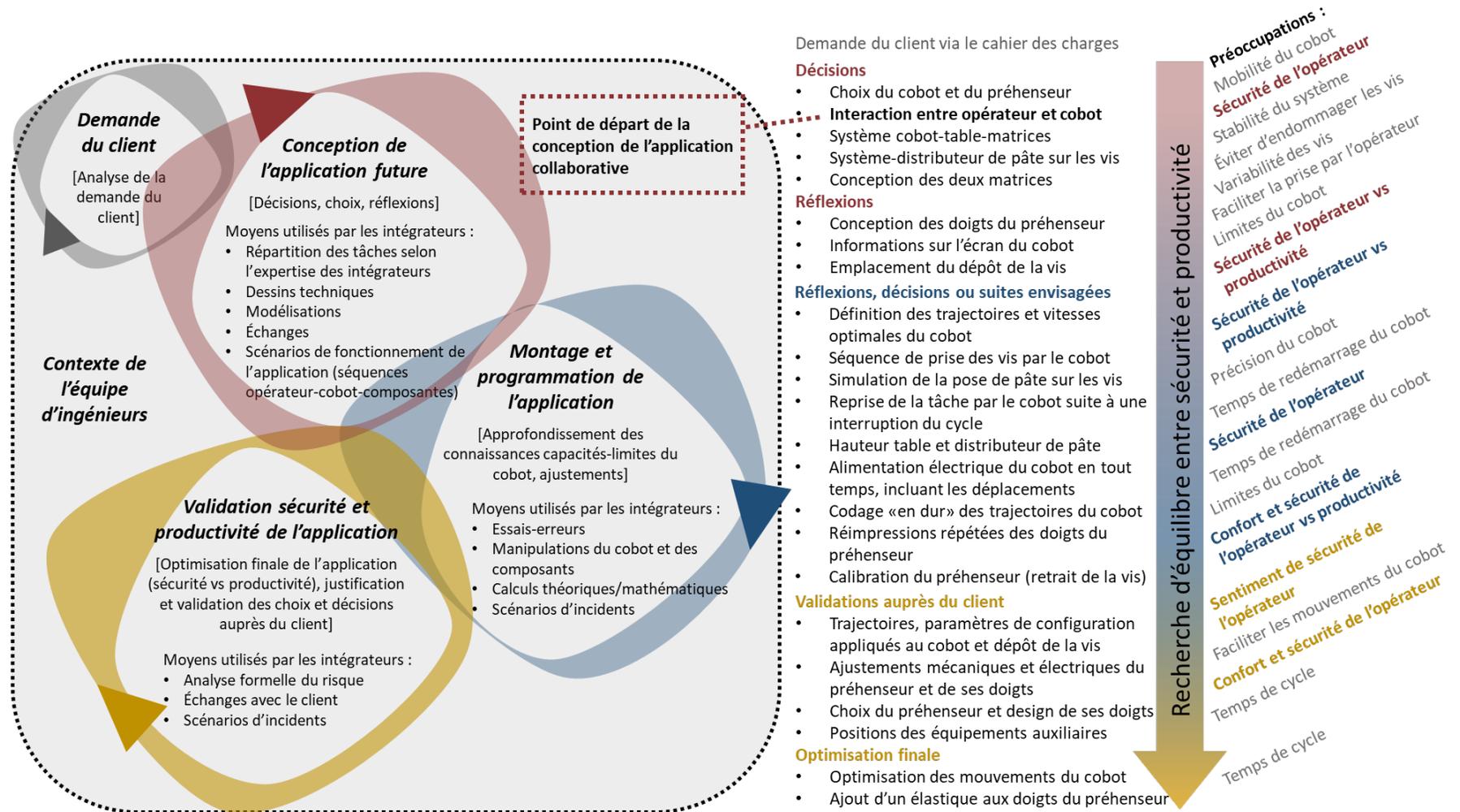
L'analyse du processus d'intégration de l'application « Moteur » a permis d'en constater la complexité. Ce processus itératif a évolué à travers trois grandes phases, tout comme pour l'application « Presse » de cet intégrateur : 1) conception de l'application future ; 2) montage et programmation de l'application ; 3) validation sécurité et productivité de l'application (figure 21). Les trois sous-sections suivantes décrivent ces phases.

Tableau 14. Synthèse du travail d'analyse des risques et de réduction des risques remis par l'intégrateur 1 pour la tâche « Moteur »

No	Phénomène dangereux ou événement dangereux ou tâche identifiés et explications		Mesure de réduction du risque	Risque	
				Initial	Résiduel
1	Basculement du cobot	Mouvement d'extension du cobot vers l'avant qui pourrait faire basculer la base d'origine sur laquelle le cobot est fixé.	<ul style="list-style-type: none"> Ajout d'une table fixée à la base du cobot et avec un appui au sol qui donne plus de la stabilité à l'ensemble. 	1/4	1/4
2	Déversement de la pâte	Déversement, fuite ou projection de la pâte utilisée pour les vis : irritation cutanée, dommage sévère aux yeux, sol glissant.	<ul style="list-style-type: none"> Réduction des projections et des contacts avec la pâte en présentant la tête de la vis à l'opérateur plutôt que son filet, et en programmant des trajectoires loin de la tête de l'opérateur. Buses recouvertes d'une mousse afin d'absorber les fuites. Port d'EPI (gants, lunette de sécurité, vêtements à manches longues). Douche oculaire disponible. 	3/4	2/4
3	Mouvement du cobot	Mouvements du cobot lors d'un cycle : <ul style="list-style-type: none"> - Impact cobot-travailleur - Impact vis-travailleur - Lacération causée par la vis 	<ul style="list-style-type: none"> Exploitation des moyens de prévention disponibles intrinsèquement sur le cobot pour se prémunir des impacts (élasticité des joints, coussinets). Élimination des zones de pincement autant que possible. Port d'EPI (gants, lunette de sécurité, vêtements à manches longues). 	3/4	2/4
4	Prise et manipulation d'une vis	<ul style="list-style-type: none"> - Lors de la prise de la vis, zone de coincement entre le préhenseur et la matrice. - Lors de l'application de la pâte, zone de coincement entre le préhenseur et la zone d'application de la pâte. 	<ul style="list-style-type: none"> Exploitation des moyens de prévention disponibles intrinsèquement sur le cobot pour se prémunir des impacts (élasticité des joints, coussinets). Pas de zone de pincement sur le cobot Port d'EPI (gants, lunette de sécurité, vêtements à manches longues). Formation de l'opérateur. 	2/4	2/4

No	Phénomène dangereux ou événement dangereux ou tâche identifiés et explications		Mesure de réduction du risque	Risque	
				Initial	Résiduel
5	Prise de la vis par l'opérateur	À la suite de la prise de la vis, coincement entre les doigts du préhenseur.	<ul style="list-style-type: none"> Réglage de la force exercée par le préhenseur au plus faible (35 N). 	2/4	2/4
6	Projection d'une vis	Projection de la vis lorsqu'elle est manipulée par le cobot.	<ul style="list-style-type: none"> Par conception des doigts, projection limitée à une direction. Ajout d'un élastique sur les doigts pour maintenir une pression favorisant le maintien de la prise de la vis. Ouverture réduite des doigts. Port d'EPI (gants, lunette de sécurité, vêtements à manches longues). 	3/4	2/4
7	Coincement cobot-moteur	Coincement de l'opérateur entre le cobot et le moteur où il doit placer les vis.	<ul style="list-style-type: none"> Caractéristiques sécuritaires intrinsèques au cobot pour contrer les impacts (élasticité des joints, coussinets) et pour favoriser l'effet non bloquant des articulations du cobot si l'opérateur le repousse. Distance minimale de 1,2 m entre la limite avant de la table et le moteur (le cobot dépasse de la table de 0,6 m au maximum). 	3/4	2/4

Figure 21. Processus d'intégration de l'application « Moteur » (Intégrateur 1).



5.5.2.1 Phase 1 : conception de l'application future

Cette phase a consisté à élaborer progressivement une représentation partagée du fonctionnement possible de la future application collaborative. Elle se caractérise par des choix, par la prise de décisions et par des réflexions autour de différents éléments de l'application à concevoir, concernant les composantes de l'application et leur configuration dans l'espace, en même temps que l'interaction entre les composantes et avec l'opérateur. Pour y parvenir, les moyens utilisés par les intégrateurs à ce stade de conception se sont avérés variés et de différentes natures, mais toujours dans une projection de ce qu'allait devenir l'application, puisque tous les équipements nécessaires au montage de l'application et l'espace en tant que tel qui lui serait attribué n'étaient pas encore accessibles à l'intégrateur 1. Cette projection s'est réalisée à travers divers moyens techniques et créatifs, tantôt par la réalisation de dessins techniques et de modélisations, tantôt à travers des échanges autour de différents problèmes de conception. Plus spécifiquement à cette phase, ces échanges ont souvent pris la forme de scénarios élaborés par les intégrateurs, dans le but de définir le fonctionnement général de l'application et de ses composantes. Ces scénarios de fonctionnement ont donc visé à décrire les potentielles opérations réalisables par le cobot et l'opérateur, de même que leur enchaînement. Par exemple, la conception du système pour enduire les vis a fait l'objet de scénarios élaborés et discutés au sein de l'équipe d'intégration :

« Donc il y a une zone où est-ce que la [pâte] ou le produit va être mis sur les vis. Les vis ne vont pas rentrer dans le réservoir. Donc on a une zone qui est plate, attachée à la table. Ça va être la zone de distribution de l'enduit lui-même où est-ce que le robot va prendre la vis et il va s'assurer d'enduire les 360 degrés de la vis avant de la présenter à l'opérateur. »

(Exemple de scénario possible d'opérations réalisables par le cobot, CR 2020-10-27)

Par ailleurs, plusieurs décisions prises à cette phase ont été majeures. En effet, elles ont eu un impact significatif sur la suite du processus, à commencer au tout début du processus par le choix du type de cobot et du préhenseur. Ces derniers ont été déterminants à plusieurs égards sur le développement de l'application dans les phases ultérieures. Notamment, le choix du cobot *Sawyer* et d'un préhenseur n'étant pas compatible à l'origine avec ce dernier, a donné lieu à une série d'étapes visant à réaliser les ajustements mécaniques et électriques nécessaires à son bon fonctionnement, dans le cadre de la phase suivante de montage et de programmation de l'application. Cette incompatibilité a complexifié le calcul de paramètres inhérents au préhenseur ou outil robotique (tableau 15).

Tableau 15. Défi de calculs liés au préhenseur et évolution de la solution

Problématique initiale d'intégration en lien avec la SST	Choix de solution et évolution de la problématique
Détermination du point central d'outil (PCO) et du centre de masse du préhenseur	Le cobot <i>UR10e</i> a servi d'outil de mesure du PCO et du centre de masse de la pince choisie <i>Schunk</i> pour <i>Sawyer</i> . Comme cette pince était compatible avec l' <i>UR10e</i> , mais pas avec <i>Sawyer</i> , il était impossible d'estimer ces deux paramètres directement depuis l'environnement de programmation du <i>Sawyer</i> . Alors, l' <i>UR10e</i> a été utilisé pour les estimer, ce qui a nécessité des va-et-vient entre les deux cobots.

De plus, toute la réflexion et les décisions prises autour de l'interaction entre l'opérateur et le cobot dès cette première phase ont été centrales pour la suite du processus d'intégration de l'application. En quelque sorte, elles ont constitué le point de départ de la conception de l'application collaborative, puisqu'elles ont donné lieu à une série de décisions concernant le type d'interaction entre le cobot et l'opérateur, et une série de choix de conception déterminant ce qu'allait devenir l'application « Moteur ». Ainsi, le choix fait par les intégrateurs de définir la tête de la vis comme étant la partie à saisir par l'opérateur, de même que la prise en compte du besoin d'enduire de pâte la partie filetée de la vis, ont mené à identifier la partie restante (entre la tête et la partie filetée) à être saisie par le cobot. Cela a directement mené à concevoir les matrices de présentation des vis au cobot en fonction de cette partie à saisir par le cobot, tous ces éléments mis ensemble menant à réfléchir dès lors à la conception des doigts du préhenseur. Par ailleurs, la sécurité de l'opérateur semble avoir été une préoccupation importante dès cette première phase et celle-ci a été évoquée à quelques reprises dans le cadre des échanges entre les membres de l'équipe d'intégration et avec l'équipe de recherche, par exemple concernant l'interaction entre l'opérateur et le cobot :

« On peut déterminer comment est-ce que l'opérateur enlève la vis du robot afin de libérer la vis de façon sécuritaire. »

(CR 2020-10-06)

De plus, plusieurs réflexions concernant des choix critiques de conception, c'est-à-dire ayant eu un impact important sur la démarche d'intégration en tant que telle, mais aussi sur ce qu'allait devenir l'activité imaginée de l'opérateur à la suite de l'intégration, ont été entamées à ce stade préliminaire de l'intégration. Parmi celles-ci, une réflexion sur la conception des doigts du préhenseur a débuté, dans la perspective de faciliter la prise de la vis par l'opérateur, tel que l'un des membres de l'équipe d'intégration le laisse entendre lorsqu'il explique :

« Ça serait important de trouver un design de gripper pour faciliter de donner la tête (de la vis) à l'opérateur »

(CR 2020-10-06)

La conception des doigts a été un processus itératif en soi en raison d'ajustements répétés visant à faciliter la prise de la vis par l'opérateur et aussi à en assurer des propriétés mécaniques pouvant résister aux contraintes mécaniques des mouvements d'ouverture et de fermeture de la pince. Ces besoins d'ajustements ont généré de multiples réimpressions des doigts.

L'emplacement du dépôt de la vis par le cobot, en termes de hauteur et de distance par rapport au cobot, et par le fait même l'endroit précis où l'opérateur serait amené à saisir la vis, a aussi fait l'objet d'un début de réflexion dès ce stade. Des éléments de prises de décision concernant à la fois la sécurité de l'opérateur, en même temps que la productivité de l'application, tant au niveau de l'intégration elle-même et des coûts lui étant associés, ont été considérés dans cette réflexion :

« C'est sûr que ça peut être un risque si on tend le robot à l'extérieur de la table de la zone du robot... »

« On verra la capacité du robot à faire ce genre de choses sans ajout de technologie externe. Parce que là, si on doit détecter la position du moteur, si on doit détecter la position de l'opérateur. Là, on parle de technologies de caméras 3D avec un ordinateur. Ça peut venir ajouter des technologies, comme j'ai dit externe au Sawyer. »

(CR 2020-11-03)

5.5.2.2 Phase 2 : montage et programmation de l'application

Alors que l'intégrateur entrait dans la phase de montage et de programmation de l'application, une idée générale de la configuration qu'allait prendre l'application, de même que la plupart des équipements auxiliaires entrant dans sa composition et leur organisation dans l'espace avaient donc déjà été établis. Cette phase plus concrète de la démarche d'intégration de l'application, étant donné qu'elle implique la manipulation physique du cobot et des composantes, est caractérisée notamment par l'approfondissement des connaissances quant aux capacités et aux limites du cobot, de même qu'aux contraintes liées à l'espace et aux équipements auxiliaires avec lesquels l'équipe devait composer. À cet effet, différents moyens techniques et créatifs ont été utilisés par les intégrateurs, suivant une méthode générale que l'on pourrait qualifier d'itérative dans le but de corriger pour optimiser le résultat. C'est ainsi qu'en testant de premiers programmes, en manipulant le cobot et les composantes, en réalisant des calculs théoriques et mathématiques pour évaluer les trajectoires qu'allaient emprunter le bras cobotisé, l'intégrateur a graduellement donné forme à l'application. C'est à cette phase que l'équipe tente de résoudre différents problèmes mis en évidence par la manipulation physique du cobot et son fonctionnement (tableau 16). Ainsi, il s'agit d'une phase caractérisée par des ajustements face à des aspects devenus tangibles. Par exemple, la découverte des contraintes liées à la durée de redémarrage du cobot Sawyer, jugée trop longue par l'intégrateur, semble avoir été déterminante dans le continuum du développement de l'application. Notamment, cette situation venait compromettre la dimension de mobilité de l'application, en considérant d'autant plus la sensibilité du

préhenseur qui pouvait mener à la fausse interprétation d'une impulsion de force lors d'un déplacement (c.-à-d. collision, retrait de la vis) et par le fait même à l'arrêt du cobot (et donc à un éventuel redémarrage). Après avoir envisagé de permettre le déplacement du cobot grâce à une alimentation autonome (batterie externe), les coûts liés à celle-ci ont fait pencher l'intégrateur vers le compromis de maintenir en tout temps l'alimentation du cobot via un fil électrique branché au mur. À cet égard, il est à supposer que si l'application était réellement utilisée en industrie, les déplacements du cobot devraient très probablement être limités autant que possible. Il est intéressant de constater comment cette propriété du *Sawyer* (durée de redémarrage) a mené l'intégrateur à faire un compromis sur la mobilité du cobot, alors que celle-ci était à l'origine un prérequis dans le choix du cobot lui-même.

Tableau 16. Exemples de défis liés au cobot et évolution de la solution

Problématique initiale d'intégration en lien avec la SST	Choix de solution et évolution de la problématique
Le cobot n'a aucune indication sur l'emplacement du distributeur, alors ses trajectoires « à l'aveugle » interfèrent avec le distributeur.	Exploiter les repères (<i>landmarks</i>) du cobot <i>Sawyer</i> . Ces repères sont des cartes codées que l'on peut fixer sur une surface. Chaque carte indique au cobot le plan par rapport auquel il devra se déplacer.
Temps de cycle : le réduire est un défi important dans cette application avec le cobot <i>Sawyer</i> . Ses articulations élastiques limitent la vitesse et les accélérations.	Souci pour améliorer le temps de cycle autant que possible : il passe de 1 min 45 s à 13,7 s (p. ex. en enlevant des points de passage dans la trajectoire du cobot). N'arrivant pas à être plus rapide, il en discute avec le client qui accepte d'augmenter le temps de cycle maximal à 14 s.

Comme évoqué, la phase de montage et de programmation de l'application s'est inscrite dans la continuité de la phase précédente. Ainsi, certaines réflexions qui avaient été entamées durant celle-ci, une fois la possibilité d'apporter des précisions que seules la manipulation et la programmation *in situ* du cobot permettaient, ont été développées davantage à ce stade. Par ailleurs, la définition et la programmation des trajectoires et des vitesses précises qu'allait emprunter le bras cobotisé dans le cadre de la séquence de prise, d'enduit de pâte et de dépôt des vis ont été au centre de l'activité des intégrateurs durant cette période. À cet égard, il a semblé que le temps de cycle de douze secondes ciblé par les intégrateurs ait été une préoccupation importante dans l'idée de tirer le maximum des capacités de mouvement et de vitesse du cobot, alors que la sécurité de l'opérateur semble avoir été également considérée dans l'équation :

« On veut que la vis soit disponible à chaque douze secondes. Ce qu'on pourrait faire éventuellement, c'est valider mathématiquement est-ce que c'est faisable de le faire en douze secondes. Pour faire ça de façon approximative, j'aimerais qu'on mesure les distances entre la position de la vis la plus loin de la zone de l'application de [pâte], on mesure la distance entre la longueur de la zone tampon pour dire voilà ce que la vis doit parcourir comme trajectoire et ensuite on mesure la

distance entre la zone tampon et la zone de dépôt, à partir de ça on va y aller avec une vitesse moyenne ou typique, une vitesse sécuritaire linéaire et on voit le temps que ça prend une vitesse approximative d'un robot collaboratif (deux mètres/seconde si je me rappelle bien ? Ou un mètre/seconde). »

(CR 2020-11-24)

Durant la phase de montage et de programmation, un autre type de scénario visant plutôt à pallier d'éventuels incidents ou dysfonctionnements de l'application ont été élaborés par l'intégrateur. Par exemple, la question de reprise de la tâche par le cobot en cas d'arrêt non prévu (collision, absence de vis, etc.) a été abordée en ce sens :

« Ingénieur 1 : Comment est-ce que tu contrôles cette situation-là ? Qu'est-ce qui arrive au robot ? Tu viens pour attraper la première pièce et la vis n'est pas dans son trou. Qu'est-ce qui arrive au robot ?

Ingénieur 2 : Il ressaye, s'il essaye deux fois et qu'il n'est pas là il met une erreur.

Ingénieur 1 : Est-ce que tu peux changer cette option-là ? De sorte à ce que, il essaye une première fois, ça ne marche pas, il essaye une deuxième fois, ça marche pas. Si ça ne marche pas une deuxième fois il passe à la vis suivante ?

Ingénieur 2 : Ça pourrait marcher, mais dans ce cas-là c'est peut-être mieux de peut-être y aller comme tu passes la première, tu glisses de côté doucement, tu essayes de toucher où est-ce qu'il y a une vis et en espérant que ça ne cause pas rien. Je touche une vis et ça pourrait être la neuvième. »

(Exemple de scénarios d'incidents probables, CR 2020-12-01)

Vers la fin de cette phase de montage physique de l'application et une fois les éléments les plus importants stabilisés, le processus s'est graduellement concentré sur des points d'optimisation et de raffinement. La calibration de la force de la pince pour le retrait de la vis par l'opérateur en est un bon exemple, qui illustre également un compromis fait par les intégrateurs entre la sécurité de l'opérateur et la productivité de l'application. Dans ce cas précis, les préoccupations des intégrateurs se sont étendues jusqu'à considérer le confort et la santé de l'opérateur dans la perspective d'un geste répété de saisir la vis 5 fois/min pour une durée totale d'assemblage du moteur d'environ 12 min, en même temps qu'ils ont tenté de préserver le plus possible la mobilité de l'application déjà mise en péril, en faisant en sorte que le cobot différencie la prise de la vis par l'opérateur d'une simple impulsion due au déplacement du cobot :

« Ingénieur 1 : J'aimerais ça que la sensibilité pour le relâchement de la vis soit moins sensible, donc il nécessite une pesée plus forte et la façon dont tu testes ça, c'est mets le robot en position relâcher la vis et bouges le robot et assure-toi que le "fresh hold" de la force ait un niveau que le robot ne démarre pas par lui-même.

Ingénieur 2 : Il ne faut pas oublier que c'est un compromis où ce que l'opérateur il faut quand même qu'il pince deux ou trois doigts. Si à chacun des 60 vis, il doit peser plus fort c'est quelque chose. »

(CR 2020-12-01)

C'est ainsi que dans un esprit d'optimisation de l'application en fonction des moyens à disposition et du temps restant pour l'intégration, qu'une transition s'est opérée vers la prochaine et dernière phase.

5.5.2.3 Phase 3 - Validation sécurité et performance de l'application

La démarche de mise en œuvre de l'application « Moteur » par l'intégrateur s'est achevée par une phase de validation de la sécurité et de la productivité de l'application, qui s'est articulée essentiellement à travers différents échanges entre l'équipe de recherche et l'intégrateur. Parallèlement et toujours s'insérant dans le continuum des étapes précédentes, les intégrateurs ont procédé à certaines dernières optimisations, toujours dans la perspective de maximiser la productivité de l'application (p. ex. optimiser le temps de cycle en limitant les mouvements du cobot pour prendre les vis et les enduire de pâte), en même temps que la sécurité de l'opérateur. À cet égard, certaines précisions apportées par l'intégrateur vis-à-vis de l'équipe de recherche ont permis de prélever d'autres indices concernant les éléments qui ont pu les influencer dans leurs prises de décisions. Par exemple, ces échanges ont permis de mieux saisir sur quoi ont reposé les choix concernant les trajectoires et les paramètres de configuration (forces, vitesses) appliqués au cobot. Il est intéressant de comprendre comment la proximité physique répétée avec le cobot par l'intégrateur qui l'a programmé a vraisemblablement sensibilisé l'intégrateur à une dimension plus subtile de la sécurité, ou du moins qui touche davantage au ressenti de l'opérateur dans son interaction de proximité avec le cobot :

« Après j'ai essayé de mettre la position qui faisait un peu le moins peur, donc il est plié au complet au-dessus de la table, il prend pas d'espace, il est déjà placé et il avance une dizaine, quinzaine de centimètres jusqu'à sortir à peu près où est-ce qu'il y a la poignée, donc il ne sort pas beaucoup de sa table, tu te fais pas surprendre, il reste dans son espace et quand il est prêt, il fait juste sortir à peine de la table, vraiment à la limite, puis après il se retire quand tu l'as enlevé pour retourner dedans pour pas que ce soit dans ta zone, donc il reste le plus possible dans son volume quand on peut. »

(CR 2020-12-15)

Ainsi, cela laisse penser que durant la phase précédente, des éléments davantage liés au ressenti ou à la dimension émotionnelle de l'expérience d'interaction réelle avec le cobot ont permis à l'intégrateur de se mettre un peu dans la peau de l'opérateur et de faire des ajustements par rapport à sa propre expérience.

Simultanément aux échanges ayant permis d'explicitier et de valider leurs choix de conception au client, une dernière boucle d'optimisations réalisée par l'intégrateur a conclu le processus d'intégration. Par exemple, l'ajout d'un élastique autour des doigts du préhenseur et l'optimisation de certains mouvements du cobot ont permis de soustraire quelques fractions de seconde au temps de cycle final de l'application.

5.6 Résultats pour la tâche B « Moteur » avec l'intégrateur 2

5.6.1 Intégrateur 2 – Tâche B « Moteur » : application collaborative, appréciation et réduction du risque

Après avoir simulé le fonctionnement préliminaire de la cellule cobotique pour la tâche B (figure 22), l'intégrateur 2 a mis en œuvre, au laboratoire de l'IRSST, la cellule cobotique associée en choisissant le cobot *UR10e* (figure 23 à figure 26). Dans l'application « Moteur » de l'intégrateur 2, le cobot effectue des mouvements pour saisir une vis noire ou grise, l'enduire d'une pâte en la faisant pivoter sous un distributeur, puis pour la présenter à l'opérateur. Celui-ci insère ensuite la vis dans le moteur simulé. Entretemps, le cobot retourne sans pièce vers la matrice de vis (figure 18, figure 19) pour recommencer la séquence. La zone de saisie d'une vis, sa masse et sa géométrie sont les éléments de variabilité exploités dans ce cas.

Figure 22. Simulation sur *RoboDK* que l'intégrateur 2 a retenue pour la tâche B (source : rapport de l'intégrateur 2).

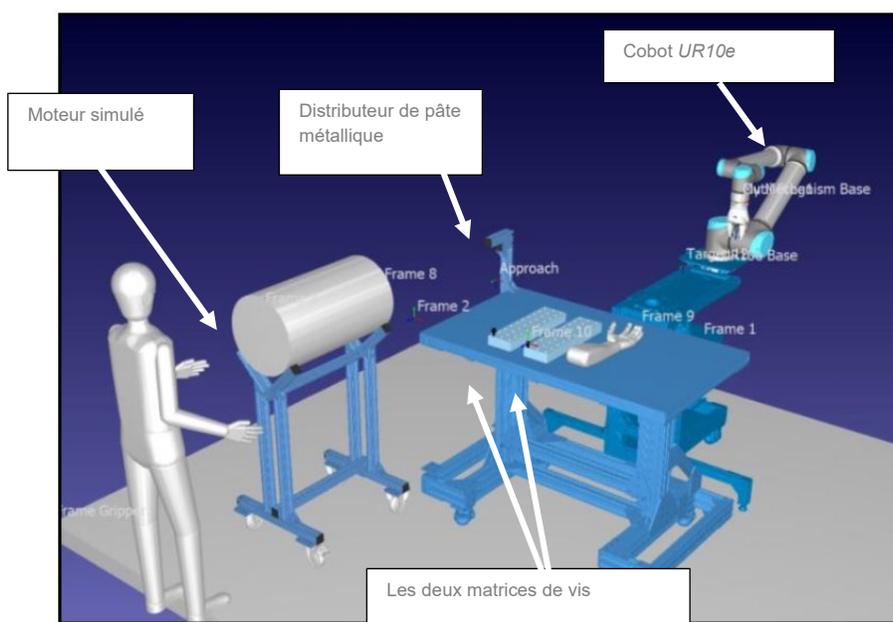
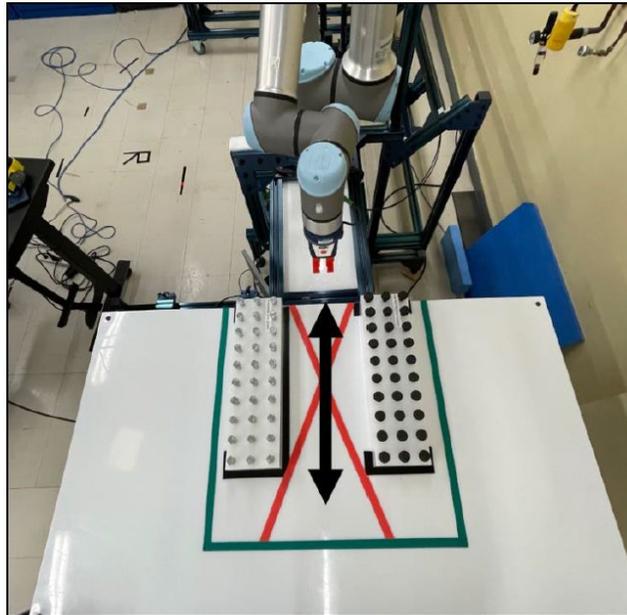


Figure 23. Agencement des composantes de la cellule cobotique de la tâche B pour l'intégrateur 2, délimitation du champ d'action du cobot et de l'opérateur (source : rapport de l'intégrateur 2).



L'intégrateur 2 a opté pour la protection de l'opérateur par éloignement du cobot. La croix rouge sur la table est un avertissement visuel indiquant la zone interdite à l'opérateur lorsque le robot est en mouvement (figure 23). Le rectangle vert de cette figure annonce à l'opérateur le champ d'action du cobot. L'intégrateur 2 a opté pour un emplacement symétrique des matrices par rapport au cobot afin d'en limiter les mouvements autant à gauche qu'à droite. Des plans de sécurité virtuels programmés dans l'environnement de l'UR10e assurent à l'opérateur que le préhenseur du cobot ne déborde pas du périmètre vert (figure 24). L'intégrateur 2 a aussi configuré une sphère virtuelle de 100 mm de rayon autour du préhenseur. Elle permet de couvrir l'intégralité du préhenseur, incluant ses doigts. Lorsqu'une partie de la sphère entre en contact avec l'un des trois plans de sécurité, le cobot s'arrête.

Figure 24. Plans de sécurité virtuels de la tâche B par l'intégrateur 2 (source : rapport de l'intégrateur 2).

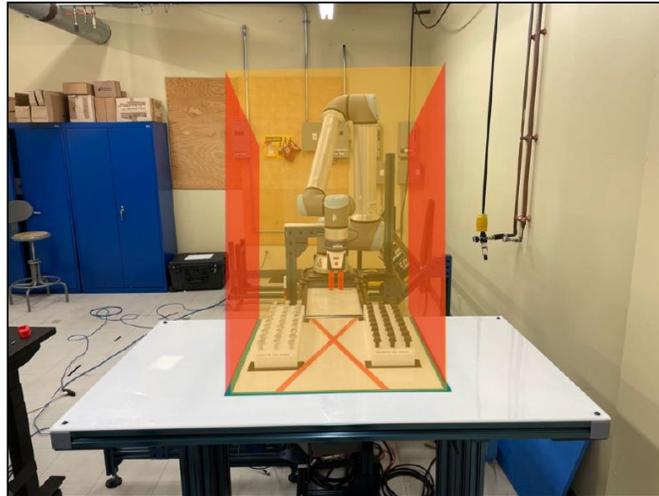
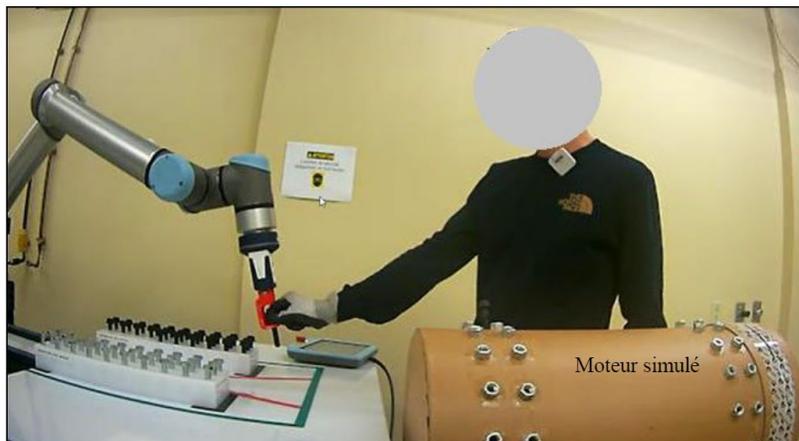


Figure 25. Doigts dessinés et imprimés en 3D par l'intégrateur 2 pour saisir les vis noires et grises (source : rapport de l'intégrateur 2).



Figure 26. Intégrateur 2 testant la cellule cobotique : il joue le rôle de l'opérateur récupérant la vis saisie par le cobot afin de l'insérer dans le moteur simulé (source : rapport de l'intégrateur 2).



Pour retirer chaque vis, l'humain pousse sur la pince. Cette poussée déclenche une légère ouverture des doigts sans pour autant échapper la vis. Ensuite, l'opérateur tire sur la tête de la vis en exerçant environ 13 N pour une vis noire et environ 11 N pour une vis grise.

Le tableau 17 présente les phénomènes dangereux identifiés par l'intégrateur 2 pour la tâche B ainsi que les mesures de réduction du risque associées (avec le même outil d'estimation du risque que pour la tâche A). Les risques initiaux prioritaires selon l'intégrateur 2 sont les risques d'impact avec le bras du cobot lors d'une intervention sur le réservoir de pâte ou à la suite d'un changement de réglages par un tiers ainsi que le basculement du cobot lors de l'intégration.

Le cobot *UR10e* étant puissant et rigide comparé au *Sawyer*, l'intégrateur 2 a organisé la cellule pour positionner l'opérateur le plus loin possible du cobot. La table qui supporte les matrices a été utilisée pour garantir cet éloignement. L'intégrateur 2 a également utilisé des plans de sécurité pour circonscrire les mouvements du cobot au-dessus de la table. Par ailleurs, comme l'opérateur peut quand même entrer dans la zone d'action du cobot (p. ex. récupération de vis ou de matrice), la vitesse du cobot a été limitée en utilisant la spécification technique ISO/TS 15066 (ISO, 2016) en complément de la détection de collision intrinsèque au cobot. L'intégrateur 2 a essayé de limiter les interventions dans la zone du cobot en réfléchissant sur certains aspects de conception de la cellule cobotique comme une fixation adéquate des matrices pour éviter leur déplacement ou encore le positionnement du réservoir de pâte en dehors de la zone d'action du cobot. Finalement, il a aussi limité la force de la pince. Les mesures de réduction choisies ne nécessitent pas de dispositif externe (p. ex. scrutateur laser).

Pour les autres phénomènes dangereux, on note que la chute du cobot et les risques associés à la pâte ont été abordés tout comme chez l'intégrateur 1. Les recommandations de formation et d'EPI ne sont par contre pas présentes. Toutefois, l'intégrateur 2 se distingue avec d'autres points comme : la mention de la mise hors tension du cobot lors des tâches de maintenance et d'intégration, la protection des réglages contre une tierce personne et les aspects de stress potentiel lié à la cadence. Le risque résiduel le plus élevé selon l'intégrateur 2 est le contact avec le cobot lors d'une collaboration en production. Les dommages associés aux phénomènes dangereux du tableau 17 sont les mêmes que pour le tableau 11.

Tableau 17. Synthèse du travail d'analyse des risques et de réduction des risques remis par l'intégrateur 2 pour la tâche « Moteur »

N°	Phénomène dangereux ou événement dangereux identifiés et explications		Mesure de réduction du risque	Risque	
				Initial	Résiduel
<i>Intégration</i>					
1	Mouvement du bras	Intégrateur à proximité pour des tests (mise en marche et programmation).	<ul style="list-style-type: none"> Garder une distance de sécurité. Garder une main sur l'arrêt d'urgence Faire les tests en vitesse réduite. 	4/10	1/10
2	Élément sous tension	Intégrateur manipulant les câbles électriques.	<ul style="list-style-type: none"> Mettre le cobot hors tension. 	1/10	0/10
3	Chute du cobot	Basculement du cobot sur l'intégrateur lors des tests.	<ul style="list-style-type: none"> Vérifier le serrage des vis de la base, sceller les vis. 	7/10	1/10
<i>Fonctionnement</i>					
4	Chute du cobot	Perte de puissance (coupure d'électricité).	<ul style="list-style-type: none"> Utiliser un arrêt de catégorie 0 permettant un arrêt sécuritaire. 	5/10	0/10
5	Mouvement du bras, impact	Mouvement non désiré ou inattention lors d'une collaboration normale.	<ul style="list-style-type: none"> Positionner le cobot pour qu'il n'atteigne pas la zone de l'opérateur. Réduire la vitesse et la force du cobot en production. Ajouter des plans de sécurité pour limiter les mouvements. 	2/10	2/10
6		Inattention en récupérant une vis tombée, en repositionnant/remplaçant une matrice sur la table.	<ul style="list-style-type: none"> Mettre le cobot en pause ou enclencher l'arrêt d'urgence ou attendre la fin d'un cycle. Encastrer les matrices pour empêcher un déplacement. 	2/10	1/10
7		Inattention lors du changement de cartouche sur le réservoir de pâte (tête de l'opérateur exposée).	<ul style="list-style-type: none"> Placer le réservoir à un endroit non exposé au cobot. Arrêter le cobot. 	6/10	1/10
8		Changement de réglage par une tierce personne.	<ul style="list-style-type: none"> Protéger les réglages par un mot de passe. 	2/10	1/10

N°	Phénomène dangereux ou événement dangereux identifiés et explications		Mesure de réduction du risque	Risque	
				Initial	Résiduel
9	Stress lié aux mouvements du cobot	Cadence trop élevée.	<ul style="list-style-type: none"> Permettre à l'opérateur de contrôler la cadence avec l'étape de prise de la vis 	2/10	1/10
10	Mouvement du préhenseur	Pincement par le préhenseur à la suite d'une défaillance.	<ul style="list-style-type: none"> Réduire la vitesse et la force du préhenseur en production. Bloquer la possibilité de fermeture de la pince lors de la récupération de la vis. 	4/10	0/10
11	Structure de l'installation	Trébuchement de l'opérateur et chute sur l'installation.	<ul style="list-style-type: none"> Délimiter la zone de travail par un marquage, signalisation. 	0/10	0/10
12	Fuite de pâte	Défectuosité du distributeur de pâte, fuite et risque de glissade.	<ul style="list-style-type: none"> Placer un récipient en dessous de la zone de graissage. Signaler à la maintenance en cas de fuite. 	3/10	0/10
<i>Maintenance</i>					
13	Cobot sous tension	Mouvement imprévisible lors d'un nettoyage dans l'enveloppe du cobot.	<ul style="list-style-type: none"> Veiller à la mise hors tension du cobot avant d'intervenir. 	2/10	1/10
14	Élément du cobot sous tension	Technicien manipulant les connectiques.	<ul style="list-style-type: none"> Veiller à la mise hors tension du cobot avant d'intervenir. 	1/10	0/10

5.6.2 Intégrateur 2 – Tâche B « Moteur » : analyse du processus d'intégration

L'analyse de l'intégration de l'application « Moteur » par l'intégrateur 2 a permis de dégager une structure d'ensemble propre à sa démarche et d'identifier les moyens utilisés par ce dernier pour concevoir son application. Fort de son expérience acquise en appréciation des risques pour l'application « Presse », cet exercice fut un peu plus facile pour lui avec l'application « Moteur ». À cet égard, une approche centrée sur la sécurité, c'est-à-dire où la sécurité de l'application est réfléchie de manière systématique, a été privilégiée dans ce cas également. Cela s'est traduit par une prise en compte fortement marquée de la sécurité de l'opérateur tout au long du processus d'intégration de l'application. Le processus d'intégration de l'application « Moteur » a évolué ici à travers deux grandes phases, dont la première a consisté à concevoir l'application par simulation assistée par ordinateur, alors que la seconde a été consacrée à l'implantation physique de l'application (figure 27 a et b).

5.6.2.1 Phase 1 : conception de l'application future et analyse de risques

Le choix du cobot *UR10e* a lancé le coup d'envoi de la grande phase de conception de l'application future :

« C'était un peu les deux mêmes justifications pour les deux applications. Je ne comptais pas utiliser de caméra du coup je mettais les deux robots au même niveau. Les caractéristiques techniques sont pratiquement identiques, il n'y a vraiment pas grand chose qui change, c'est très minime. Vraiment, le point qui m'a fait pencher sur l'*UR* et pas l'*Omron*, c'était le fait qu'il y avait une assistance technique plus facile à avoir. »

(CR 2021-02-16)

Le début du processus de conception de l'application s'est concentré sur la relation spatiale de l'opérateur et du moteur, par rapport au bras cobotisé. Essentiellement, les préoccupations partagées par l'intégrateur portaient sur le risque que l'opérateur soit frappé par le bras cobotisé (tableau 18) :

« Oui, au tout début je l'avais mis à gauche [le robot] et le moteur à droite. Le problème par rapport à ça, c'est que, en fonction de la première simulation que j'avais faite, l'opérateur avait le dos tourné pendant qu'il devait effectuer le vissage des vis et ben, c'était du coup un risque apparemment inacceptable, du coup qu'il soit vraiment tourné au robot. Du coup, il ne l'avait plus dans son champ de vision. Et

en le mettant à côté aussi, je me suis dit que comme l'opérateur serait sûrement amené à bouger pour changer les matrices, etc., le fait que le robot soit si proche de sa zone, je trouvais ça dangereux. Je me suis dit que c'était mieux de le mettre derrière la table... »

(CR 2021-01-25)

Tableau 18. Souci d'éviter les collisions et évolution de la solution

Problématique initiale d'intégration en lien avec la SST	Choix de solution et évolution de la problématique
Protection de l'opérateur contre les collisions avec le cobot	<ul style="list-style-type: none"> • L'intégrateur 2 se renseigne sur la peau sensible <i>Airskin</i> et sur l'appareil de mesure d'impact de <i>Pilz</i>. • Au début : il souhaite utiliser un rideau optique et les fonctions de limitations d'angles du cobot, en plus du <i>safety flange</i> d'<i>Airskin</i> (bride de sécurité enveloppant le préhenseur de sorte qu'une collision avec celui-ci déclenche un signal d'arrêt de sécurité au contrôleur du cobot). Si ce n'est pas suffisant, il éloignerait physiquement le cobot. • L'<i>Airskin</i> est trop contraignant, selon lui, car il réduit l'amplitude des axes du cobot pour cette application. • Après réflexion, il conclut qu'aucun dispositif de protection externe au cobot n'est nécessaire. Le cobot est physiquement incapable d'aller au-delà de la table. Le cobot détient des plans de sécurités virtuels et une limitation de la force du préhenseur. • Il calcule la vitesse de production acceptable pour la collaboration en utilisant le graphique de l'annexe A de l'ISO/TS 15066 (ISO, 2016).

Figure 27a. Processus d'intégration de l'application « Moteur » (intégrateur 2).

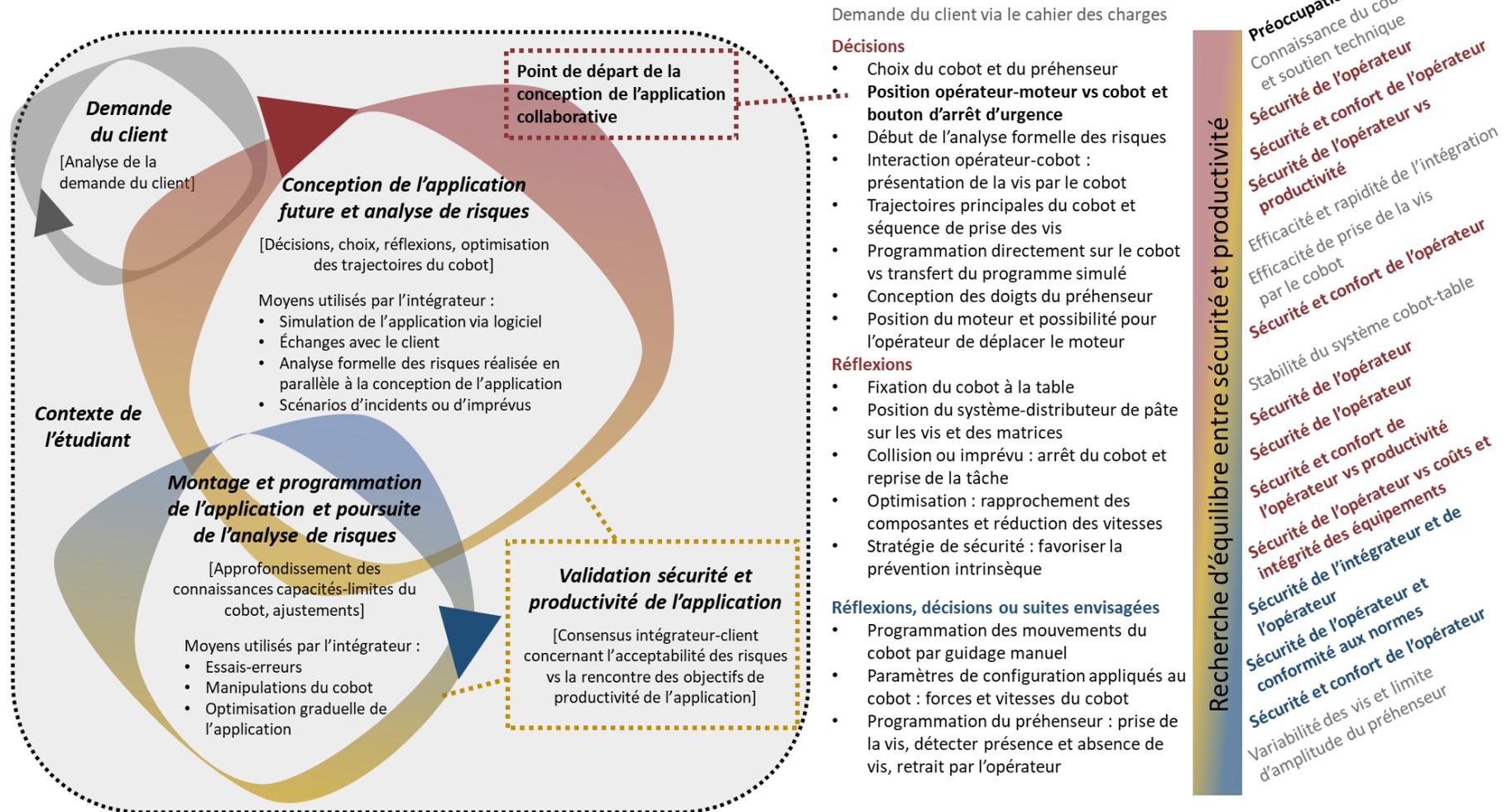
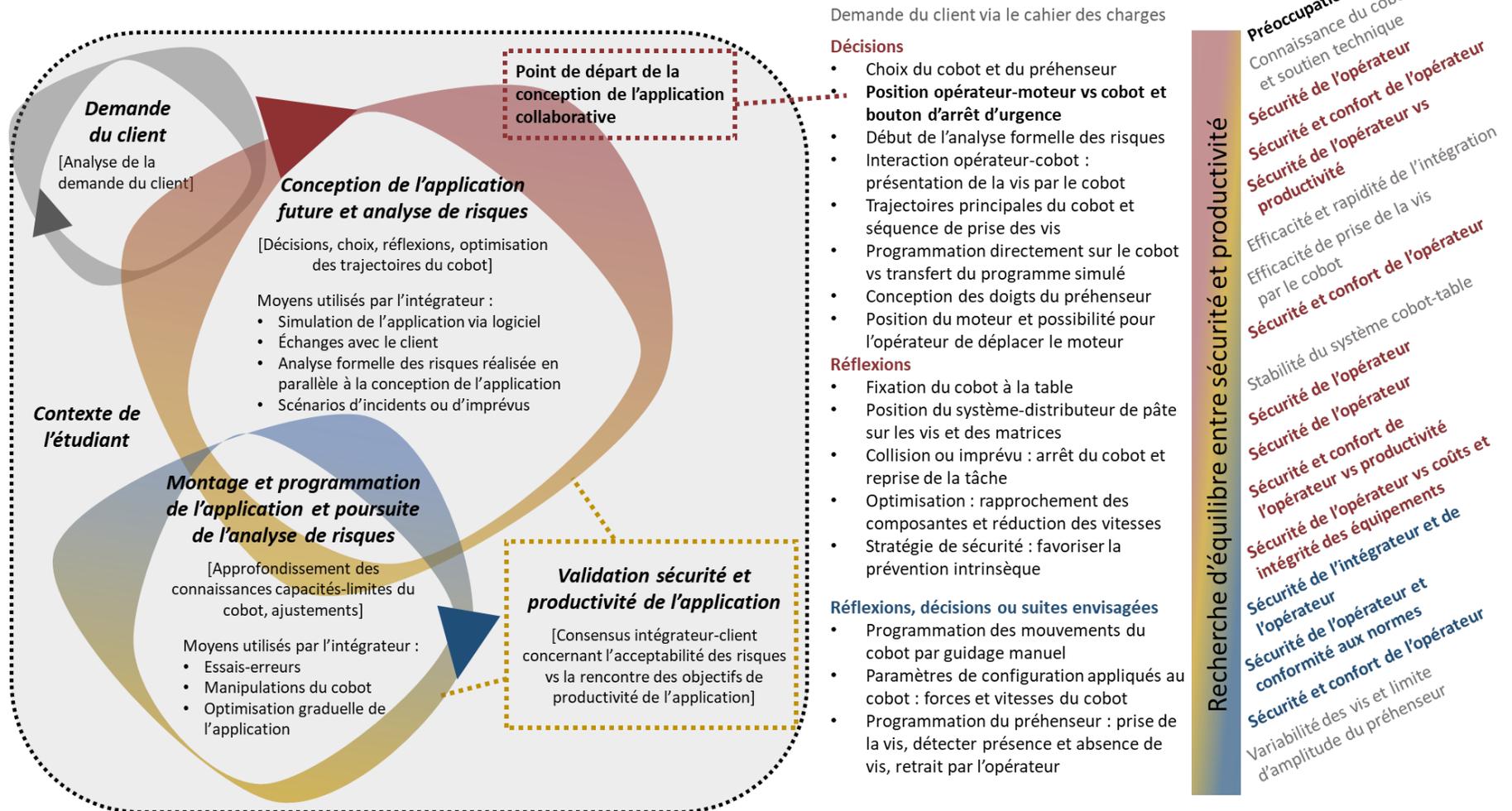


Figure 27b. Processus d'intégration de l'application « Moteur » suite (intégreur 2).



Cette configuration du positionnement de l'opérateur et du moteur séparés du cobot par une table dont la longueur assurerait une distance correspondant à la portée maximale du bras cobotisé a été déterminante pour la suite des choses, puisqu'elle a jeté les bases de ce qu'allait devenir l'application dans son ensemble. Ce choix représente le point de départ de la conception de l'application (encadré en pointillé rouge, figure 27a).

La simulation virtuelle a contribué de manière importante à l'organisation préliminaire des composantes de l'application dans l'espace, à l'optimisation préliminaire des trajectoires du bras cobotisé, tout en tenant compte de la sécurité de l'opérateur. Toutefois, l'intégrateur 2 a rencontré des limites importantes quant à la possibilité de définir avec précision certains éléments clés de l'application, par simulation. Notamment, concernant l'interaction entre l'opérateur et le préhenseur du cobot (p. ex. façon de présenter la vis à l'opérateur), l'intégrateur 2 a dû procéder davantage en élaborant des scénarios de fonctionnement :

« Dans la simulation, j'ai pas pu faire vraiment ce que je voulais parce qu'on n'a pas exactement ce qu'il est possible de faire dans la réalité. Du coup, j'ai juste simulé un dépôt sur la main. Dans la vraie vie, j'aimerais que le robot apporte la vis. Du coup, on en a discuté avec [les professeurs], on pense faire des marquages peut-être sur la table ou... avec un objet physique, indiquer à l'opérateur exactement où va se fixer la zone de dépôt et ce serait en fait l'opérateur qui viendrait tirer sur la vis pour récupérer la vis. Le robot la lâcherait pas forcément, il [l'opérateur] exercerait une petite pression sur la vis, on l'a... peut-être la plus légère possible, on va voir pour régler ça pour qu'il puisse l'enlever facilement et que le robot, une fois la vis enlevée, puisse faire à nouveau un graissage. »

(Exemple de scénario possible d'opérations réalisables par le robot, CR 2021-01-25)

Avec cet extrait, on constate l'importance accordée par l'intégrateur non seulement à la sécurité de l'opérateur, mais aussi à son confort, et ce tant au niveau physique que psychologique. Du moins, c'est ce qu'il laisse croire lorsqu'il partage son intention de privilégier une pression la plus légère possible de l'opérateur pour retirer la vis du préhenseur (CR 2021-01-25), ou d'éviter des mouvements brusques du bras cobotisé lors de sa trajectoire d'approche de l'opérateur (CR 2021-02-16).

La phase de conception de l'application future a également donné lieu à plusieurs réflexions. Celles-ci allaient faire l'objet de décisions ou de choix d'équipements spécifiques lors de la prochaine phase de montage et de programmation de l'application, facilités par la manipulation physique du système robotique et des équipements auxiliaires. Par exemple, le positionnement du système d'enduit des vis et des matrices de présentation des vis a été réfléchi à ce stade :

« Après j'avais mis le graissage et les matrices le plus à gauche possible pour vraiment que le robot fasse son travail de son côté, le plus loin possible de l'opérateur. C'était vraiment pour ça que j'ai tout éloigné très loin et qu'au final, on

se retrouve avec une simulation pas optimisée en termes de mouvement, parce que c'est vrai que..., il y a un mouvement un peu de triangle qui se fait et qui ajoute beaucoup de temps au cycle. »

(CR 2021-01-25)

Ainsi, la simulation virtuelle de l'application a aussi permis à l'intégrateur 2 d'anticiper des enjeux de productivité. Dans ce cas précis, il a pris conscience que la disposition éloignée des composantes de l'application par rapport à l'opérateur, bien qu'elle favorisait sa sécurité, engendrerait de trop longues trajectoires du bras cobotisé, cela compromettant la productivité de l'application. À cet égard et toujours par le biais de la simulation, il a pu réfléchir dès lors à une première boucle d'optimisation de l'organisation des composantes, visant leur rapprochement et par le fait même, le raccourcissement des trajectoires du bras cobotisé. Ce faisant, il a également réfléchi à ajuster sa stratégie de sécurité, en envisageant par exemple une réduction de la vitesse du bras cobotisé lors du mouvement d'approche de l'opérateur :

« Après même là dans la configuration actuelle, enfin même deux secondes, c'est vraiment rapide et même en optimisant les déplacements, je pense que le robot aura quand même une cadence de vitesse assez élevée je pense quand même. Oui, j'avais pensé, je l'avais simulé un peu pour que le dernier mouvement du robot vers l'opérateur soit beaucoup plus faible que le reste de la simulation. »

(CR 2021-01-25)

La phase de conception de l'application future, réalisée en parallèle à l'analyse de risques, s'est ainsi poursuivie jusqu'à une éventuelle transition vers la phase d'implantation physique de l'application collaborative.

5.6.2.2 Phase 2 : montage et programmation de l'application et poursuite de l'analyse de risques

Le montage physique de l'application « Moteur » s'est fait dans la continuité de la phase précédente, c'est-à-dire en se focalisant sur la sécurité de l'opérateur, par le biais d'aller-retour entre le développement de l'application et l'analyse de risques. Par contre, tel qu'évoqué, certains aspects importants de l'application et touchant plus particulièrement à l'interaction physique entre l'opérateur et le cobot (p. ex. la prise de la vis tenue par le cobot) n'avaient pu être définis de manière précise, compte tenu notamment des limites du logiciel de simulation utilisé. Par conséquent, l'intégrateur s'est consacré, d'une part, à la programmation des mouvements du bras cobotisé tels que conçus par simulation, et d'autre part à compléter la conception de l'application de façon plus détaillée, au fur et à mesure de l'implantation des composantes et de l'avancement de ses connaissances quant aux capacités et limites du système robotique et de ce que sa manipulation physique permettait. Puis, toujours dans le même cadre de suivi de l'intégrateur par l'équipe de recherche, des échanges réguliers visant un consensus éclairé entre l'acceptabilité des risques pour l'opérateur et la rencontre des objectifs de productivité de l'application se sont poursuivis (encadré en pointillé jaune, figure 27b).

Il a fallu dans un premier temps que l'intégrateur s'attarde à déterminer une façon pour le cobot de détecter la présence ou l'absence de pièces, dans ce cas-ci de vis, via son préhenseur, afin de déclencher son cycle d'opérations :

« En gros, pendant la simulation, je n'avais pas trouvé de moyen pour que le robot lâche la vis à l'opérateur ou que plutôt quand l'opérateur a récupéré la vis, je ne sais pas par quel moyen dire au robot tu peux retourner vers le deuxième cycle récupérer une autre vis. À part mettre un "wait", mais je ne trouvais pas ça très sécuritaire de juste dire au robot tu attends cinq secondes, au bout de cinq secondes, normalement tu n'auras plus de vis, tu pourras repartir. Du coup, là l'idée c'était de, je ne sais pas encore comment je vais l'intégrer, mais c'était en gros que le robot arrive avec la vis à proximité d'un capteur et que, une fois que l'opérateur a retiré la vis, du coup, le capteur n'aura plus la vis dans son champ de vision. Une fois que la vis ne sera plus dans le champ de vision [du capteur], que le robot, du coup, il ait le signal de repartir pour faire la deuxième vis, la troisième et ainsi de suite. » (solution non retenue finalement)

(CR 2021-03-09)

La suite de l'implantation physique de l'application « Moteur » par l'intégrateur 2 s'est poursuivie à travers l'alternance de boucles d'optimisation, tant en termes de sécurité que de productivité de l'application. L'une des avancées importantes de l'intégrateur à cet égard a découlé d'une itération majeure concernant le positionnement des matrices de présentation des vis (figure 23 et figure 24) :

« La distance [entre les matrices], il y a un peu d'aléatoire et de calcul on va dire. Je voulais juste laisser un minimum de place pour que le gripper avec la vis puissent se déplacer dans cette zone pour faire les allers-retours sans qu'on ait touché la table ou la matrice. Parce que, une fois qu'il y a la vis avec le gripper, du coup, on n'a plus d'amplitude dans les mouvements. [...] Et pour ne pas avoir un changement de hauteur à faire pour le robot, j'ai préféré laisser un espace entre les deux matrices pour pas que la vis vienne se taper dans les matrices. Et puis aussi je me suis dit c'était peut-être bien de faire quelque chose de symétrique dans la disposition des éléments sur la table. Comme ça, ça permet de laisser le choix à l'opérateur de déplacer le moteur soit gauche ou à droite, par exemple, s'il est droitier il serait plus à l'aise avec le moteur d'un côté, gaucher un autre côté. Et aussi au bout d'une demi-journée, peut-être que ça ferait du bien à l'opérateur de déplacer le moteur d'un autre côté pour avoir des mouvements différents, pour que ça ne soit pas toujours le même bras qui travaille. »

(CR 2021-03-23)

Ce nouveau positionnement espacé et symétrique des deux matrices de présentation des vis, comme cet extrait l'évoque, offrait plusieurs avantages en termes de productivité de l'application, notamment en permettant une économie de mouvements du bras cobotisé qui favorisait l'atteinte du temps de cycle ciblé au départ. Il est intéressant de constater également les considérations de l'intégrateur 2 à l'égard du confort de l'opérateur dans la

perspective du geste répétitif propre à sa tâche, lorsqu'il préconise la possibilité pour celui-ci de varier ses mouvements grâce au positionnement symétrique des matrices par rapport à la table (le moteur peut ainsi être positionné à gauche ou à droite par rapport à la table).

L'intégration de l'application « Moteur » s'est ainsi poursuivie, dans une optique d'optimisation de l'application jusqu'à la toute fin, allant par exemple jusqu'à limer les doigts du préhenseur, afin de faciliter au maximum le retrait de la vis par l'opérateur. Ce retrait a été possible en programmant le cobot de sorte qu'une poussée générée par l'opérateur sur la pince commande l'ouverture de ses doigts. Cette ouverture est telle que les doigts desserrent la tête de la vis sans l'échapper. Ainsi, l'opérateur peut facilement la récupérer pour l'installer sur le moteur. Le tableau 19 montre que ce besoin de retirer la vis par l'opérateur a généré beaucoup de réflexions et des versions différentes de doigts qui ont dû être réimprimés à plusieurs reprises.

Tableau 19. Défis liés à la conception des doigts de la pince et évolution de la solution

Problématique initiale d'intégration en lien avec la SST	Choix de solution et évolution de la problématique	
Conception des doigts de la pince : quelle forme donner aux doigts ? Comment les fabriquer ?	Aller-retour entre l'intégrateur 2 et son directeur de maîtrise. Suggestion de laisser suffisamment d'espace entre le haut et le bas des doigts pour permettre à l'opérateur de prendre la vis. L'axe de la vis doit coïncider avec l'axe de l'axe 6 du cobot. Cela facilitera la rotation de la vis lors de l'application de la pâte. Par contre, il faut s'assurer que la pince peut tourner suffisamment malgré les câbles.	
	Première des diverses ébauches d'un des deux doigts de la pince : 	Doigts définitifs : 

6. DISCUSSION

6.1 Retour sur la méthodologie et les résultats

La méthodologie a commencé par la caractérisation des tâches industrielles cobotisées. Cette caractérisation a été possible à partir d'analyses de vidéos montrant ces tâches, d'une visite sur le terrain et d'une collecte d'avis d'experts. L'analyse des vidéos a permis d'identifier des éléments de variabilité à considérer lors de l'intégration d'une application collaborative, par exemple ceux rattachés aux spécifications techniques du cobot, aux caractéristiques de sa tâche et aux caractéristiques des pièces manipulées. La collecte d'avis d'experts a permis de valider les variables de caractérisation des tâches observées en vidéos et sur le terrain, puis d'élargir nos horizons sur les tâches autres que celles observées.

D'une part, cette caractérisation a permis de comptabiliser, par famille, les tâches observées (tableau 5). D'autre part, elle a permis de définir cinq classes d'applications collaboratives : 1) la collaboration directe en alternance, 2) la collaboration directe d'assistance, 3) la collaboration indirecte séquentielle, 4) la collaboration indirecte parallèle et 5) le partage d'espace occasionnel sans collaboration. Les définitions des classes traduisent la variation de la complexité de l'interaction humain-cobot. La définition d'une classe est utile à tout intégrateur voulant démarrer son analyse des risques d'une installation cobotique, puisqu'elle donne une idée du degré de complexité de l'interaction. Ainsi, la comptabilisation des tâches a permis de choisir la première tâche à reproduire en laboratoire ; il s'agissait de la tâche la plus fréquemment observée : le chargement-déchargement de machine. Ensuite, la comptabilisation des tâches et la définition des classes ont permis de retenir la seconde tâche à reproduire en laboratoire ; il s'agissait de la tâche la plus répandue où la sécurité du travailleur est complexe à gérer, en raison d'une présence plus marquée des éléments de variabilité ou d'une proximité plus soutenue de l'humain avec le cobot. La seconde tâche retenue était l'assemblage.

À la lumière des éléments de variabilités identifiés lors de la caractérisation des tâches industrielles cobotisées et des classes d'applications collaboratives définies, les deux tâches retenues ont été précisées. Ainsi, le cahier des charges destiné aux deux intégrateurs du projet listait les spécificités pour une tâche de chargement-déchargement de presse plieuse hydraulique (Tâche A « Presse »), puis pour une tâche d'assemblage d'un moteur (Tâche B « Moteur »). Ce cahier donnait aussi la possibilité à l'intégrateur de mettre en œuvre deux à quatre scénarios de variabilités par tâche, c.-à-d. deux à quatre versions de la cellule cobotique associée à une tâche. La tâche A correspond à la classe 5 d'application collaborative, tandis que la tâche B relève de la classe 1.

Pour mettre en œuvre les cellules cobotiques, les deux intégrateurs ont créé leurs scénarios de variabilités en fonction des éléments de variabilité admissibles inscrits dans le cahier des charges (figure 5 et figure 7). Les tableaux suivants rappellent les éléments de variabilité retenus par chaque intégrateur, tout en décrivant brièvement le profil de ce dernier et son approche de conception.

Chaque intégrateur a commencé par mettre en œuvre la tâche A « Presse », puis a enchaîné avec la tâche B « Moteur ». Au cours de l'exercice, chaque intégrateur a commencé par une analyse préliminaire et informelle des risques de l'installation, puis l'a formalisée plus tard dans le processus, en se basant sur des normes pertinentes et en créant un tableau d'analyse des risques et de réduction des risques qu'il pouvait réviser au besoin (p. ex. après avoir réalisé qu'un choix de production augmentait le risque d'accident pour l'humain). Lors de l'intégration de la tâche B, chaque intégrateur a réutilisé, avec quelques ajustements, son approche de conception (analyse du risque incluse) adoptée pour la tâche A (tableau 20 et tableau 21).

Tableau 20. Rappels au sujet de l'intégrateur 1

Profil	Éléments de variabilité retenus	Approche de conception générale
<p>Équipe d'ingénieurs et de techniciens ayant un ingénieur comme chef de projet. Ils s'y connaissent en robotique.</p> <p>Un membre de l'équipe d'intégration détient une formation en sécurité des machines.</p>	<p>Pour la tâche A « Presse », l'intégrateur 1 a choisi de faire varier :</p> <p>1) le temps de cycle, 2) la masse des plaques en acier et 3) la zone de dépôt.</p> <p>Pour la tâche B « Moteur », l'intégrateur 1 a choisi de faire varier :</p> <p>1) la zone de saisie d'une vis, 2) sa masse et 3) sa géométrie.</p>	<p>Cobot et type de préhenseur choisis :</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>UR10e</i> (tâche A) avec ventouses ; • <i>Sawyer</i> (tâche B) avec pince, aux doigts conçus et imprimés en 3D par l'intégrateur. <p>Processus de conception véhiculé par trois boucles itératives et interactives, induites par des allers-retours avec le client et par la recherche d'équilibre entre sécurité et productivité. Ces trois boucles portaient sur : 1) la conception de l'installation, 2) la validation, 3) le montage et la programmation.</p> <p>L'analyse des risques s'est formalisée après que la programmation du cobot fut suffisamment fonctionnelle (tâche A) ou quasi terminée (tâche B). Toutefois, l'intégrateur 1 avait le souci constant de savoir où se trouverait l'humain dans la cellule cobotique afin de programmer et d'agencer, de manière sécuritaire, les composantes de l'installation.</p> <p>Principaux moyens de prévention et de protection :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tâche A : plans de sécurité, scrutateur laser, vitesse réduite, arrêt de protection ; • Tâche B : limitation de la puissance et de la force par conception.

Tableau 21. Rappels au sujet de l'intégrateur 2

Profil	Éléments de variabilité retenus	Approche de conception générale
<p>Étudiant à la maîtrise, formé en automatisation.</p> <p>En cours de projet, il se forme sur la programmation du cobot et sur la sécurité des machines.</p>	<p>Pour la tâche A « Presse », l'intégrateur 2 a choisi de faire varier la masse des plaques en acier.</p>	<p>Cobot et type de préhenseur choisis :</p> <ul style="list-style-type: none"> • UR10e (tâche A) avec ventouses ; • UR10e (tâche B) avec pince, aux doigts conçus et imprimés en 3D par l'intégrateur.
	<p>Pour la tâche B « Moteur », l'intégrateur 2 a choisi de faire varier :</p> <p>1) la zone de saisie d'une vis, 2) sa masse et 3) sa géométrie.</p>	<p>Processus de conception véhiculé par deux boucles itératives et interactives, induites par des allers-retours avec le client et par la recherche d'équilibre entre sécurité et productivité. Ces deux boucles portaient sur : 1) la conception de l'installation et l'analyse des risques, 2) le montage, la programmation et la poursuite de l'analyse des risques. La validation faisait partie intégrante de chaque boucle.</p> <p>L'analyse des risques s'est formalisée très tôt dans le processus, une fois l'emplacement des composantes déterminées dans la simulation sur RoboDK. L'intégrateur 2 avait le souci constant de savoir où se trouverait l'humain dans la cellule cobotique afin de programmer et d'agencer, de manière sécuritaire, les composantes de l'installation.</p> <p>Principaux moyens de prévention et de protection :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tâche A : plans de sécurité, scrutateur laser, vitesse réduite, arrêt de protection ; • Tâche B : protection par éloignement, plans de sécurité, limitation de la force par commande et réduction de vitesse. <p>Fonctions de sécurité choisies en fonction des niveaux de performance requis qu'a estimés l'intégrateur 2.</p>

Des quatre processus étudiés, nous retenons principalement qu'ils ont été marqués par des compromis entre sécurité et productivité. Pour certains de ces compromis, des choix penchant pour la sécurité de l'opérateur laissent croire, paradoxalement, à leur capacité d'altérer la santé de l'opérateur. Un exemple de ces choix est la protection par éloignement exploitée par l'intégrateur 2 pour assurer la sécurité de l'opérateur dans la tâche B « Moteur ». Bien que la protection par éloignement soit reconnue par l'ISO 12100 (ISO, 2010a) comme une excellente solution en prévention intrinsèque, la figure 26 montrant le bras en extension de l'intégrateur qui exerce une prise en pince de la vis, soulève des questions sur les contraintes physiques auxquelles peut s'exposer un opérateur éventuel. Cet exemple montre la possibilité qu'une solution relevant de la

sécurité de l'opérateur puisse affecter sa santé. À noter également que, grâce à cet éloignement, l'intégrateur peut se permettre de faire fonctionner le cobot plus rapidement que si celui-ci était plus proche de l'opérateur. Dans ce cas, on gagne en sécurité et en productivité, mais on perd en santé.

En matière de santé, les intégrateurs se sont parfois préoccupés à réduire la pénibilité de l'opérateur, par exemple, lors de l'intégration de la tâche B « Moteur ». En reconcevant puis réimprimant les doigts ou en s'évertuant à trouver l'inclinaison qualitativement optimale de la pince, ils cherchaient à faciliter autant que possible la prise, par l'opérateur, de la vis tendue par le cobot. Malgré ces initiatives, les processus d'intégration étudiés sont très peu marqués par la considération des contraintes physiques et des risques de TMS associés aux choix de conception. Le fait d'avoir eu un opérateur fictif pour les quatre processus étudiés plutôt qu'un opérateur réel peut expliquer ce manque. De plus, l'absence de formation en ergonomie des intégrateurs ou l'absence d'ergonomes dans l'équipe d'intégration sont des éléments pouvant expliquer aussi ce manque.

6.2 L'intégration d'une application collaborative : une tâche de conception

L'intégration d'une application collaborative présente des caractéristiques similaires à une tâche de conception. En ergonomie cognitive, Darses *et al.* (2004) définissent cette tâche comme une activité de construction et de résolution de problème. Ces auteurs précisent qu'une tâche de conception se caractérise, entre autres, par le fait que 1) le problème à résoudre est complexe et mal défini ; 2) les spécifications du cahier des charges sont incomplètes ; 3) la résolution du problème nécessite le plus souvent plusieurs domaines d'expertise ; 4) la définition du problème ainsi que son élaboration s'effectuent en interaction ; 5) la solution n'est pas unique, mais fait plutôt partie d'un ensemble de solutions jugées acceptables ; et enfin 6) l'évaluation de la solution ne peut se faire que de façon partielle, sur la base de simulations.

Selon ces auteurs, pour construire et résoudre un problème de conception, une personne procéderait à 1) la construction d'une représentation mentale du problème initial (souvent décomposé en sous-problèmes) ; 2) au développement d'une solution intermédiaire et 3) à l'évaluation de la solution intermédiaire. Précisons qu'une solution peut être développée en partie, reprise ultérieurement et évaluée en étapes (Visser, 2002). Ce cycle se répète successivement et se raffine jusqu'à l'atteinte d'une solution complète finale jugée acceptable.

La conception de l'application collaborative par l'intégrateur 1, composé d'une équipe d'ingénieurs et de techniciens avec des expertises distinctes, va alterner entre des phases

de conception distribuée² et de co-conception³. L'application collaborative se développe progressivement au fur et à mesure du travail individuel de chacun et des échanges entre les membres de l'équipe partageant un but final commun soit la conception d'une application collaborative productive et sécuritaire. L'analyse du processus d'intégration a permis de mettre en évidence le rôle du chargé de projet, plus expérimenté, qui remet en question certains choix d'autres membres de l'équipe d'intégration, formule des contre-propositions ou bien amorce de nouvelles boucles de développement de solutions. De même, un des membres de l'équipe « Intégrateur 1 », qui s'est initié à l'analyse de risque, a joué un rôle clé dans l'identification des phénomènes dangereux et dans les échanges menant à la détermination des mesures de réduction de risque à prévoir.

L'intégrateur 2, un étudiant à la maîtrise en génie de la production automatisée, développe, pour sa part, principalement une activité de conception individuelle, accompagnée toutefois par ses professeurs encadrants, spécialisés en sécurité des machines, qui ont repris, en partie, le rôle du chargé de projet de l'équipe de l'intégrateur 1.

Pour se construire une représentation des « problèmes de conception » successifs, les intégrateurs vont mobiliser différents types de scénarios. Dès le début de la phase de conception, des scénarios de fonctionnement de l'application sont élaborés pour explorer différentes séquences possibles d'opérations à réaliser ainsi que leur répartition possible entre l'humain et le cobot. Dans cette phase, la représentation que se construisent les intégrateurs des interactions entre l'humain et le cobot, leur niveau d'interdépendance, de synchronisation opératoire et gestuelle orientent plusieurs décisions, ce qui se traduit, entre autres, par une préoccupation pour la sécurité des opérateurs qui traverse cette phase. La conception médiée par un logiciel de simulation comme *RoboDK* a aidé l'intégrateur 2 à progresser vers des scénarios d'activité future probable de l'opérateur : où va se placer l'opérateur ; s'il s'approche du cobot dans cette zone... ; s'il n'arrive pas à suivre la cadence, etc. (Daniellou, 2004). Ce type de scénarios a contribué à l'appréciation précoce des risques dans le processus d'intégration qui caractérise l'activité de conception de cet intégrateur.

La progression de la phase de conception vers la phase de montage et de programmation amène les intégrateurs à imaginer aussi des scénarios d'incidents probables, plutôt liés aux défaillances possibles du cobot, qui serviront à instruire l'appréciation du risque, à identifier progressivement les phénomènes dangereux et à prendre progressivement des décisions sur les mesures de réduction du risque. Dans la phase de montage, les critères

² Les concepteurs travaillent simultanément, non conjointement, mais en parallèle sur certaines parties du projet de conception. Chacun accomplit une des différentes tâches dans lesquelles le projet a été décomposé préalablement et qui lui a été allouée. Chacun a ses propres sous-buts, tout en connaissant le but commun final (Visser, 2002).

³ Les concepteurs travaillent conjointement sur le projet de conception et partagent un but commun identique, à l'atteinte duquel chacun contribue selon ses compétences spécifiques (Visser 2002).

de productivité de l'application en lien avec l'exploration des défaillances possibles du cobot ou de situations imprévues guident plusieurs décisions.

Enfin, lors de la phase de montage, l'expérience d'un contact physique avec le cobot a amené les deux intégrateurs à développer une autre conscience de la situation (appréciation de la grosseur du bras, de l'énergie engendrée par la vitesse, etc.) (Chalandon, 2007) qui s'est traduite en repère de conception (p. ex. laisser le plus possible le cobot dans son volume) ayant orienté certaines solutions. Cette phase expose aussi les intégrateurs à des risques de coincement, d'écrasement ou d'impact avec le cobot ce qui les amènent à élaborer des stratégies de prudence pour se protéger au cours du processus d'intégration.

Dans la prochaine section, la discussion portera plus particulièrement sur les différentes formes que prend l'appréciation et la réduction du risque dans l'activité de conception des intégrateurs tout au long du processus d'intégration.

6.3 Appréciation du risque, réduction du risque et productivité dans l'activité de conception des intégrateurs

En matière de gestion du risque en robotique industrielle (cobotique incluse), le chapitre 4 de la norme ISO 10218-2 (ISO, 2011b) présente les prescriptions pour apprécier les risques et les réduire. Le chapitre 5 de cette norme détaille les exigences de sécurité et mesures de prévention associées. Plus précisément, sa section 5.11 indique les exigences de sécurité spécifiques aux applications collaboratives. Le message clé de la norme est l'obligation d'apprécier le risque sur tout le cycle de vie de l'installation afin de choisir les mesures nécessaires pour réduire les risques à un niveau acceptable. Cette norme, ainsi que la spécification technique ISO/TS 15066 (ISO, 2016) qui la complète, proposent principalement les quatre méthodes décrites à la section 1.1 pour réduire les risques associés à une application collaborative. Rappelons que chacune de ces méthodes peut être utilisée seule ou en combinaison.

La suite de cette section discute de l'appréciation et de la réduction du risque tout au long de l'intégration des applications collaboratives observées avec des thèmes comme : 1) le niveau de formalisme, l'aspect itératif ou encore l'exhaustivité lors l'appréciation du risque, 2) les outils d'estimation du risque et 3) les choix en matière de réduction du risque.

6.3.1 Appréciation du risque lors de l'intégration

Au début de l'intégration

L'appréciation des risques n'a pas été formelle tout au long des quatre processus d'intégration. Dans le cas de l'intégrateur 1, lorsque cette appréciation était informelle (p. ex. verbale ou consignée sans modèle d'analyse), elle comprenait principalement l'identification de phénomènes dangereux et des situations dangereuses associées. Ces situations dangereuses se révélaient à l'intégrateur selon son expérience passée et selon celles qui se manifestaient en cours d'intégration. Basé sur son ressenti de la situation dangereuse identifiée, l'intégrateur 1 déterminait directement une manière de réduire le risque en question. D'ailleurs, au tout début de l'intégration, l'analyse du risque ne peut

être que partielle puisque de nombreuses décisions qui ont un impact sur la sécurité n'ont pas encore été prises ou viennent juste de l'être (p. ex. : choix du cobot, rôle de l'opérateur dans l'application, zone de prise et de dépôt du cobot, vitesse de déplacement du cobot). Aussi, selon les résultats obtenus, la personne visée par l'appréciation du risque à cette étape-ci est essentiellement l'intégrateur lui-même (pour rester dans un exercice concret), même s'il considère l'utilisateur final. Il s'agit de la première itération de l'analyse du risque (c.-à-d., risques initiaux sans mesures de réduction du risque). Comme l'identification des phénomènes dangereux est primordiale et critique afin d'éviter d'omettre certains risques associés (Main, 2004), procéder à cette première identification des risques est un incontournable, même si cela est fait à défaut de manière informelle.

À noter que l'intégrateur 2 a commencé son appréciation des risques de manière plus formelle dès l'étape de simulation, à partir du moment où l'emplacement du cobot, de l'humain et des autres composants ont été déterminés. Ensuite, il a mis à jour son appréciation au fur et à mesure des ajustements apportés à l'agencement simulé, puis des modifications apportées lors de l'intégration en laboratoire. Le fait que l'intégrateur 2 commençait à concevoir les applications collaboratives en simulation peut expliquer pourquoi il a pu formaliser sa démarche un peu plus tôt que l'intégrateur 1 qui est entré dans le vif du sujet plus rapidement.

Lors du développement de l'application collaborative

Lors du développement de l'application, beaucoup de facteurs (regroupés à la section 6.4) vont influencer la nature des risques. Le processus de conception devient très dynamique et les décisions de conception et de gestion du risque s'influencent l'une l'autre. Certains risques influencent des décisions en lien avec la conception (p. ex. application « Moteur » : éloigner le cobot en plaçant la table entre celui-ci et l'opérateur) et certaines décisions en lien avec la conception, notamment liées à des problèmes de faisabilité technique, introduisent des risques (p. ex. application « Presse » : utilisation de ventouses pour saisir les pièces avec le risque de projection de la pièce). Dans cette phase, selon nos observations, toutes les décisions en lien avec la gestion des risques ne sont pas formalisées par écrit. L'intégrateur 1 a finalement formalisé son appréciation des risques (c.-à-d., dans une forme proche de ce qui est demandé dans les normes en sécurité des machines) une fois les applications stabilisées. Soulignons que le qualificatif « stabilisé » est très subjectif. Par exemple, le membre de l'équipe « Intégrateur 1 » qui s'occupait principalement de l'application « Moteur » a effectué son appréciation des risques une fois que son installation était complétée et la programmation suffisamment au point ; dans ce cas, il s'est servi de l'aspect formel de l'appréciation des risques uniquement pour vérifier l'acceptabilité du risque résiduel. Le membre de l'équipe « Intégrateur 1 » qui s'occupait principalement de l'application « Presse » a apprécié les risques de son installation une fois montée et minimalement fonctionnelle avec une version préliminaire de la programmation. Selon les résultats, le point de bascule se manifeste lorsque certains paramètres de l'application sont fixés comme : le rôle du cobot et de l'opérateur, la zone de prise et de dépôt (et donc les principaux mouvements ou encore le volume d'action) et le choix du préhenseur.

En comparaison avec les normes en sécurité des machines, il s'agit ici de la deuxième itération de l'appréciation du risque, c.-à-d. les risques initiaux avec les mesures déjà en place. En analysant les livrables des intégrateurs, cette appréciation s'oriente désormais vers les utilisateurs futurs (opérateur, maintenance). À cette étape, les grands principes sont donc fixés (p. ex. protection par éloignement physique avec des équipements auxiliaires (application « Moteur ») ou un dispositif de protection sensible externe (application « Presse »).

Phase d'optimisation

Une fois l'application cobotique stabilisée et les principes de réduction du risque établis, les intégrateurs sont entrés dans des boucles d'optimisation associées au temps de cycle du cobot et à la sécurité de l'opérateur. À cette étape-ci, il y a en permanence une préoccupation d'équilibre entre sécurité et productivité (p. ex. pour l'application « Moteur », boucle visant à gagner quelques secondes dans le temps de cycle tout en restant sécuritaire). La troisième itération de l'appréciation du risque vise à s'assurer que les risques résiduels sont théoriquement acceptables⁴ pour les utilisateurs avec les mesures prises et faire les derniers ajustements. Il s'agit de la validation finale en matière d'appréciation des risques.

En résumé

L'appréciation du risque pour les intégrations étudiées n'a pas été un processus avec des étapes clairement définies dans le temps. Ce sont d'abord des actions tout au long du projet d'intégration au fil des événements. Toutefois trois itérations d'appréciation du risque ont pu être observées avec les deux intégrateurs. La première itération au début du projet est partielle et consiste en une première identification des phénomènes dangereux. Elle est partielle à cause du fait que l'application est en construction. Par exemple, l'intégrateur 1 a dû attendre l'installation pour faire une appréciation des risques plus formelle. La deuxième itération se formalise (surtout pour l'intégrateur 1), intègre des principes de réduction du risque en concomitance avec les choix de conception. On peut situer cette itération lorsque l'application se stabilise (p. ex. : zone de prise et de dépôt de pièce, position des équipements auxiliaires) même si la notion de « stabiliser » n'est pas clairement définie dans les cas observés. Par exemple, au moment de l'étape formelle de l'appréciation des risques décrétée par l'intégrateur 1, l'un des membres de l'équipe « Intégrateur 1 » affirmait que s'il avait su, il aurait effectué cette étape plus tôt pour éviter de reprogrammer ou reconfigurer son installation « Presse » en cours de route (c'est considéré comme une perte de temps). La dernière itération suit les boucles

⁴ Un risque acceptable est notamment lié au concept de *As Low As Reasonably Practicable* (aussi faible qu'il est raisonnable d'atteindre) (American National Standards Institute/American Society of Safety Engineers [ANSI & ASSE], 2011). Le niveau de risque est acceptable lorsqu'il ne peut être abaissé davantage que par une augmentation des dépenses en ressources disproportionnée par rapport à la diminution du risque qui en résulterait. La norme ISO 12100 définit aussi une « réduction du risque adéquate » (ISO, 2010a).

d'optimisation, notamment pour atteindre les exigences de temps de cycle. Il s'agit de la validation finale quant aux risques résiduels.

À la lumière de ces quatre processus d'intégration, il est compréhensible qu'une appréciation formelle des risques ne se construise pas avant d'avoir une première idée de l'installation. Cependant, une fois que l'emplacement des divers équipements par rapport aux humains concernés est déterminé, même de manière préliminaire, nous croyons qu'il est nécessaire de formaliser l'appréciation des risques. Aussi, la question du formalisme de l'appréciation des risques au début de l'intégration est indépendante de l'importance de mener une réflexion en matière de gestion du risque le plus tôt possible (à cette étape le fond est plus important que la forme). C'est un point essentiel. En observant le travail des deux intégrateurs, nous constatons que la prise de décision sur les mesures de réduction du risque incluant la programmation a été plus directe chez l'intégrateur 2 et plus itérative chez l'intégrateur 1. Ainsi, une approche plus directe exige moins de révisions de l'intégration.

6.3.2 Identification des risques et outils d'estimation du risque utilisés

Les deux intégrateurs se sont basés sur une approche normalisée en sécurité des machines et en robotique (cf. normes annoncées en 6.1). Leurs démarches étaient assez classiques dans le sens où une grille par application présentait l'analyse des risques et les mesures de réduction du risque identifiées. Ces grilles listaient les phénomènes dangereux et les événements dangereux identifiés pour diverses phases du cycle de vie de l'installation : fonctionnement normal, configuration, dépannage, entretien, réparation dans le cas de l'intégrateur 1 et intégration, fonctionnement et maintenance dans le cas de l'intégrateur 2. Les phénomènes dangereux étaient assez similaires en fonctionnement normal (c.-à-d., production) et basés sur des risques liés au cobot (risques de collision, de coincement), au préhenseur (risque de coincement), à la pièce (risque de projection, de laceration, de se faire heurter par la pièce qui tombe), aux équipements auxiliaires comme les chariots, la presse (risque de trébucher ou de se faire amputer), aux produits (risque de glisser sur la pâte échappée). D'un intégrateur à l'autre, le découpage des risques et la granulosité des situations dangereuses ont été un peu différents. Les intégrateurs sont allés au-delà du cobot et ont pris en compte l'application au complet comme recommandé par les normes en vigueur. Ils ont aussi opté autant que possible pour la prévention à la source (p. ex. : vitesse réduite, force réduite, éloignement, plan de sécurité, trajectoire vers l'intérieur du corps du cobot), puis pour les dispositifs de protection lorsque nécessaire (p. ex. scrutateur laser).

Concernant l'identification des risques, on peut tout de même noter que l'intégrateur 1 s'est principalement concentré sur les risques d'origine mécanique auxquels les dommages suivants sont associés : impact cobot-opérateur ou pièce-opérateur, laceration par la pièce, etc. L'intégrateur 2 a ratissé plus large en incluant les risques électriques également. Les risques mécaniques sont les plus évidents et courants et donc sont le plus souvent considérés au détriment des risques d'autres natures plus difficiles à apprécier dans le contexte d'une intégration réalisée en laboratoire (risque de TMS, risque

psychosocial, etc.). On observe la même tendance dans des livres comme celui d'Aldinhas Ferreira et Fletcher (2021).

Dans son analyse formelle des risques, l'intégrateur 1 a souvent indiqué la tâche à laquelle correspondait le risque étudié. L'intégrateur 2, de son côté, mentionnait parfois l'opération liée à la tâche, dans la description de la situation dangereuse. Considérer la tâche en appréciation des risques est reconnue pour être efficace puisqu'elle permet d'identifier davantage de phénomènes dangereux pertinents. En effet, l'approche basée sur les tâches se concentre sur ce que les gens font, ce qui aide l'équipe d'évaluation des risques à mieux identifier la manière dont une personne pourrait être blessée (Main, 2004).

Concernant l'estimation du risque, les outils utilisés par les intégrateurs permettaient de faire coïncider les niveaux de risques avec les niveaux de fiabilité requis pour les fonctions de sécurité chargées de les réduire. Il s'agissait d'un critère de sélection de l'outil d'estimation du risque. Les outils choisis avaient moins de biais que celui de l'ISO 13849-1 (ISO, 2015) en raison des trois niveaux de dommage qui permettent d'initier l'estimation de risque contrairement aux deux niveaux de la norme (Gauthier *et al.*, 2016). Cette norme qui porte sur la fiabilité des circuits de commande où transitent les fonctions de sécurité propose un outil de détermination du niveau de performance requis (niveau discret de fiabilité requis). Ces processus d'intégration rappellent donc qu'il est plus pratique et optimal d'utiliser un outil d'estimation du risque non ou peu biaisé qui permet systématiquement d'estimer le niveau de fiabilité requis pour le réduire, dans les cas où des fonctions de sécurité sont exploitées (p. ex. : fonction d'arrêt généré par un scrutateur laser, fonction d'arrêt généré par un franchissement du plan de sécurité du cobot par une partie de son bras).

Aussi, les niveaux de risques indiqués dans les grilles des intégrateurs à la suite de la mise en place des mesures pour réduire les risques montrent qu'ils ont estimé les risques résiduels. Cependant, l'inexactitude de la manière dont certains niveaux de risques ont diminué souligne à nouveau le besoin d'outiller des intégrateurs en cobotique, voire en sécurité des machines, de manière à optimiser la justesse de leur appréciation des risques. Par exemple, pour l'application « Moteur » de l'intégrateur 1, la grille d'analyse de risque montre que pour le risque de projection de la vis, la gravité du dommage (yeux atteints) passe du niveau 2 « Modéré » au niveau 1 « Sans gravité », grâce à l'utilisation d'EPI. Or, les EPI n'agissent pas sur la gravité du dommage puisque le phénomène dangereux reste à la même intensité ; c'est plutôt l'exposition des yeux qui devrait passer du niveau 2 au niveau 1, mais ce paramètre demeure inchangé dans leur grille. Toujours en matière de risque résiduel, la conception mécanique des deux chariots devrait être améliorée au niveau du système de fixation. En effet, dans les deux cas, l'opérateur doit se pencher et il y a perte de la vision sur le cobot. Il y a donc un risque de se frapper la tête contre des arêtes vives.

6.3.3 Réduction du risque

Les intégrateurs ont choisi les mesures de réduction du risque en suivant la hiérarchie proposée par la norme ISO 12100 (ISO, 2010a), c'est-à-dire la prévention intrinsèque, la protection, les mesures complémentaires et les informations pour l'utilisation. Dans un premier temps, les intégrateurs n'ont pas tenté d'utiliser ou de reproduire les méthodes 1, 2, 3 ou 4 de la norme ISO 10218 (ISO, 2011a ; ISO, 2011b) pour réduire le risque (méthodes décrites à la section 1.1 du rapport). Ils ont plutôt constaté en cours de route que leurs choix s'apparentaient à l'une de ces méthodes en particulier, puis ont cherché à suivre cette méthode selon l'ISO 10218-2 (ISO, 2011b) pour l'intégrateur 1 et l'ISO/TS 15066 (ISO, 2016) en complément de cette norme pour l'intégrateur 2.

D'après les résultats obtenus, les éléments suivants ont un impact particulièrement important sur la manière dont l'intégrateur va sécuriser l'application :

- Le choix du cobot, en plus d'impacter la précision de la tâche, a eu une influence sur la gestion du risque de collision et notamment l'organisation de la cellule. Par exemple, pour l'application « Moteur », l'intégrateur 2 a travaillé sur l'éloignement contrairement à l'intégrateur 1 qui avait un cobot intrinsèquement plus sûr. Aucun dispositif de sécurité externe (p. ex. scrutateur) n'a été utilisé pour l'application « Moteur ». Les intégrateurs ont privilégié la sécurité intrinsèque au cobot donc la plus efficace (p. ex. : détection de contact, vitesse réduite, plan de sécurité, travail sur les trajectoires ou éloignement par conception). Ces mesures ont été suffisantes selon l'analyse du risque des intégrateurs. Le non-usage de dispositif de protection externe a été validé en raison de l'absence d'éléments pointus ou coupants contrairement aux pièces de l'application « Presse » et aussi à cause des caractéristiques de prévention disponibles intrinsèquement sur le cobot (p. ex. : articulations arrondies ou souples du cobot, capacité à s'arrêter en cas de collision). La possibilité de réglage de la force de pincement permet de gérer les risques associés simplement. Toujours pour exploiter la prévention intrinsèque, éviter d'utiliser un cobot surdimensionné par rapport à la charge à soulever (cas de l'*UR10e* qui soulève des vis que pourrait soulever un cobot *UR3e*) faciliterait la gestion de risques. En effet, un cobot adapté comme l'*UR3e* aurait moins d'inertie et une portée beaucoup plus restreinte. Le fait que les cobots utilisés aient été imposés aux intégrateurs met en exergue qu'opter pour des cobots adaptés à la tâche prévue faciliterait le processus de gestion de risques.
- Le point précédent suggère également qu'au-delà du cobot, le type de pièce à manipuler et le type d'outil robotique ont un impact très important sur la sécurisation de la cellule, notamment l'utilisation de dispositifs de sécurité externes et même la vocation collaborative de l'application, dans le sens où le cobot n'est pas à l'arrêt lorsqu'une personne approche. Dans le cas de l'application « Presse », le type de pièce à manipuler empêchait l'utilisation du cobot *Sawyer*, plus collaboratif, mais moins puissant et précis. De plus, l'aspect coupant des pièces oblige à tenir l'opérateur à distance lors des manipulations. On a le cas inverse pour l'application « Moteur ».
- Les contraintes de temps de cycle et de productivité impactent la vitesse de déplacement imposé au cobot. Un temps de cycle trop court obligera des

accélérations et des vitesses importantes au cobot, pas toujours compatibles en matière de sécurité avec la présence d'un opérateur.

La réduction du temps de cycle, en gardant les accélérations et les vitesses du cobot au minimum, passera par l'optimisation des distances et des trajectoires. Cette optimisation, qui doit prendre en compte la sécurité de l'opérateur, passe par le lissage des trajectoires du cobot, la minimisation du nombre de changements de directions au niveau du bras du cobot, l'emplacement des zones de prise et de dépôt de pièces le plus proche de la zone d'opération du cobot ou de l'humain quand c'est le cas. Une des conséquences en termes de sécurité peut être la minimisation du volume occupé par le bras du cobot et la pièce manipulée. Par exemple, avec l'intégrateur 2 et l'application « Moteur », la disposition du distributeur de pâte et des matrices est avantageuse puisqu'elle minimise les distances et contient les mouvements du cobot dans un petit volume (productivité et sécurité). Dans le cas de l'intégrateur 1 et l'application « Presse », la trajectoire du cobot pour atteindre le chariot perpendiculaire a été repensée en cours d'intégration pour faire la rotation de la pièce proche du cobot lors du déplacement plutôt que par un arc de cercle loin de la base du cobot.

Une autre manière d'optimiser le temps de cycle est de minimiser les temps d'attente du cobot à cause par exemple d'une répartition inappropriée des tâches entre le cobot et l'humain ou une mauvaise conception de la gestion des stocks de pièces aux zones de prise et de dépôt. Par exemple, pour l'application « Moteur », on pourrait remettre en cause le cahier des charges qui impose que l'opérateur prenne la vis directement du préhenseur (note : condition imposée pour obliger l'intégrateur à gérer une collaboration directe séquentielle caractérisée par une synchronisation opératoire et gestuelle entre l'opérateur et le cobot). Une zone tampon de dépôt aurait peut-être été mieux adaptée pour la gestion du temps de cycle, mais aussi pour réduire l'interdépendance entre le cobot et l'opérateur et offrir à ce dernier plus de marge de manœuvre. Enfin, une autre avenue à explorer pour optimiser la productivité serait de mettre à profit l'intelligence artificielle pour gagner du temps en évitant à un travailleur l'étape peu valorisante de positionnement des pièces que devra manipuler le cobot (p. ex. cas des vis positionnées dans les matrices de l'application « Moteur »). Des algorithmes de reconnaissance d'images permettraient d'identifier la pièce en vrac à saisir, puis à tendre à l'opérateur. Ainsi, même en présence d'une vitesse réduite pour protéger l'opérateur du cobot, on pourrait sûrement gagner en productivité en considérant l'application dans sa globalité : pas seulement limitée à la prise de la vis par un opérateur, mais qui inclut également l'étape de préparation des pièces que le cobot devra saisir :

- La formation de l'intégrateur influence les choix dans son processus décisionnel. Rappelons la présence du membre de l'équipe « Intégrateur 1 » qui avait déjà été initié à l'analyse de risque en sécurité de machines et en sécurité robotique, contrairement à plusieurs de ses collègues. Grâce à cette formation en sécurité, il a facilité l'identification des phénomènes dangereux à son équipe. Ses connaissances ont également influencé positivement les discussions aboutissant aux choix des mesures de réduction de risques (p. ex. trajectoire du cobot pour le chariot perpendiculaire pour l'application « Presse »). Dans le cas de

l'intégrateur 2, celui-ci se formait en cours de projet sur la sécurité des machines. Par exemple, au fil de ses lectures, il s'est formé sur les outils d'estimation du risque en sécurité des machines. Se former en ce sens l'a poussé à opter pour un outil d'estimation du risque qui suivait des règles de construction reconnues et qui proposait des correspondances pour l'estimation du PL. En plus de cette formation en sécurité, être formé en robotique ou en automatisation (aspects électromécaniques et de programmation) a permis aux intégrateurs de trouver des astuces pour contourner des difficultés d'intégration. Par exemple, l'intégrateur 1 qui programme et paramètre le cobot de manière à ce que celui-ci différencie la force de prise de la vis par l'opérateur d'une simple impulsion de force générée par un déplacement du cobot.

- Les informations que les intégrateurs reçoivent de leur entourage influencent leurs choix de mesures de réduction de risques, aussi rattachés aux aspects de productivité selon le cas. Par exemple, dans l'application « Moteur » de l'intégrateur 1, l'un des membres de l'équipe d'intégration insiste sur l'importance de trouver une géométrie de pince facilitant la prise de la tête de vis par l'opérateur. De même, rappelons que le directeur de maîtrise de l'intégrateur 2 lui a suggéré de laisser suffisamment d'espace entre le haut et le bas des doigts pour permettre à l'opérateur de prendre la vis. Le directeur de maîtrise lui émet également des recommandations afin que la rotation de la vis sous le distributeur de pâte se déroule sans encombre. Dans ces deux cas d'intégration, ces informations provenant de l'entourage ont influencé les intégrateurs dans le choix de la géométrie des pinces. En facilitant la prise de la tête de vis, l'opérateur récupérera plus rapidement la vis d'une part et d'autre part, sa charge mentale se trouvera diminuée.

D'autres facteurs de variabilité sont à considérer au début de l'analyse du risque et peuvent avoir un impact sur la réduction du risque. Ils sont présentés à la section suivante.

6.4 Pistes de réflexion : des facteurs de variabilité comme outil contribuant à la prévention

Comme annoncé dans l'introduction, un argument en faveur de notre étude touche le besoin de méthodes visant à encadrer le travail des intégrateurs de cellules cobotiques en milieu industriel, à des fins de prévention. En effet, une consultation publique (Simmonds *et al.*, 2017), mandatée par la Commission européenne, a relaté que les technologies émergentes comme la robotique collaborative ne sont pas traitées dans la Directive « Machines » européenne. Trois quarts des répondants affirment que les normes associées à ces technologies n'abordaient pas le sujet ou le niveau de détails de ces normes était insuffisant. L'ISO/TS 15066 (ISO, 2016) précise que l'intégrateur doit effectuer une appréciation du risque, conforme à la section 4.3 de l'ISO 10218-2 (ISO, 2011b). Une fois le besoin de collaboration identifié, l'intégrateur doit procéder à l'implantation du système robotique avec :

- la définition des limites de temps (temps de cycle, cycle de vie : mise en service, configuration, production, maintenance, réparation et démontage doivent être considérés) ;

- la définition des limites d'utilisation (fonctions, modes, outillage, compétence de l'utilisateur) ;
- la définition des limites de l'espace (mouvement, installation et maintenance, tâches de l'opérateur, reconfiguration, accès, espace pour les équipements auxiliaires) ;
- l'identification des phénomènes dangereux et des tâches (surveillance, chargement, programmation, détection de panne, maintenance et réparation, nettoyage) ;
- l'estimation puis l'évaluation du risque associé aux situations dangereuses identifiées ;
- la suppression des phénomènes dangereux ou la réduction du risque.

Cette section porte plus spécifiquement sur les trois premiers points listés, c.-à-d. les limites du système étudié.

Comme l'illustre la figure 7, le cahier des charges a listé les éléments de variabilité que chaque intégrateur pouvait choisir afin de composer des scénarios de variabilités. Toutefois, les quatre processus d'intégration étudiés ont montré que d'autres éléments de variabilité ont également influencé la gestion des risques lors de leurs processus d'intégration. Ainsi, les résultats du rapport liés à ces processus, la caractérisation des tâches industrielles cobotisées et les discussions précédentes ont permis de concevoir un modèle qui regroupe les facteurs de variabilité à considérer lors de l'intégration d'une application collaborative. Ce regroupement correspond à la détermination des limites de l'installation, détermination demandée dans les normes ISO 10218-2 (ISO, 2011b) et ISO 12100 (ISO, 2010a), au début du processus d'appréciation du risque d'une machine.

Ainsi, la figure 28 et la figure 29 regroupent l'ensemble des facteurs de variabilité notés durant l'étude et qui influencent le processus décisionnel des deux intégrateurs suivis durant leur activité d'intégration. L'étude des quatre processus est venue confirmer concrètement cette figure, initialement le fruit d'une combinaison des constats et résultats du chapitre 4 et des prescriptions normatives de l'ISO 10218-2 (ISO, 2011b) et de l'ISO 12100 (ISO, 2010a). Ces facteurs de variabilité correspondent à la première étape de l'analyse des risques, c.-à-d. déterminer les limites de l'application collaborative dans une approche d'évaluation des risques. En réponse au besoin soulevé dans l'introduction, cette figure contribuera à outiller correctement les intégrateurs puisque les facteurs de variabilité identifiés théoriquement ont été constatés au fil des processus d'intégration. Bien que le contexte d'intégration manquait de réalisme à certains moments (p. ex. : équipements auxiliaires simulés, absence des contraintes organisationnelles d'entreprises), ces figures peuvent servir de point de départ. Une étape subséquente à ce projet serait d'étudier son usage par des intégrateurs en contexte réel d'entreprise. Cette figure consiste donc en un premier accomplissement de la méthode ou de l'outil générique souhaité à long terme et annoncé à la section 1.3 pour gérer les risques des applications collaboratives.

Plus spécifiquement, caractériser les interactions humains-cobots au chapitre 4 a rappelé l'importance de considérer tous les éléments avoisinant le cobot lors de l'appréciation des risques. Ainsi, l'interaction entre le trio humain-cobot-équipement forme le centre des figure 28 et figure 29. Des flèches illustrent cette interaction sur ces figures.

Figure 28. Facteurs de variabilité influençant le processus d'intégration (partie 1).

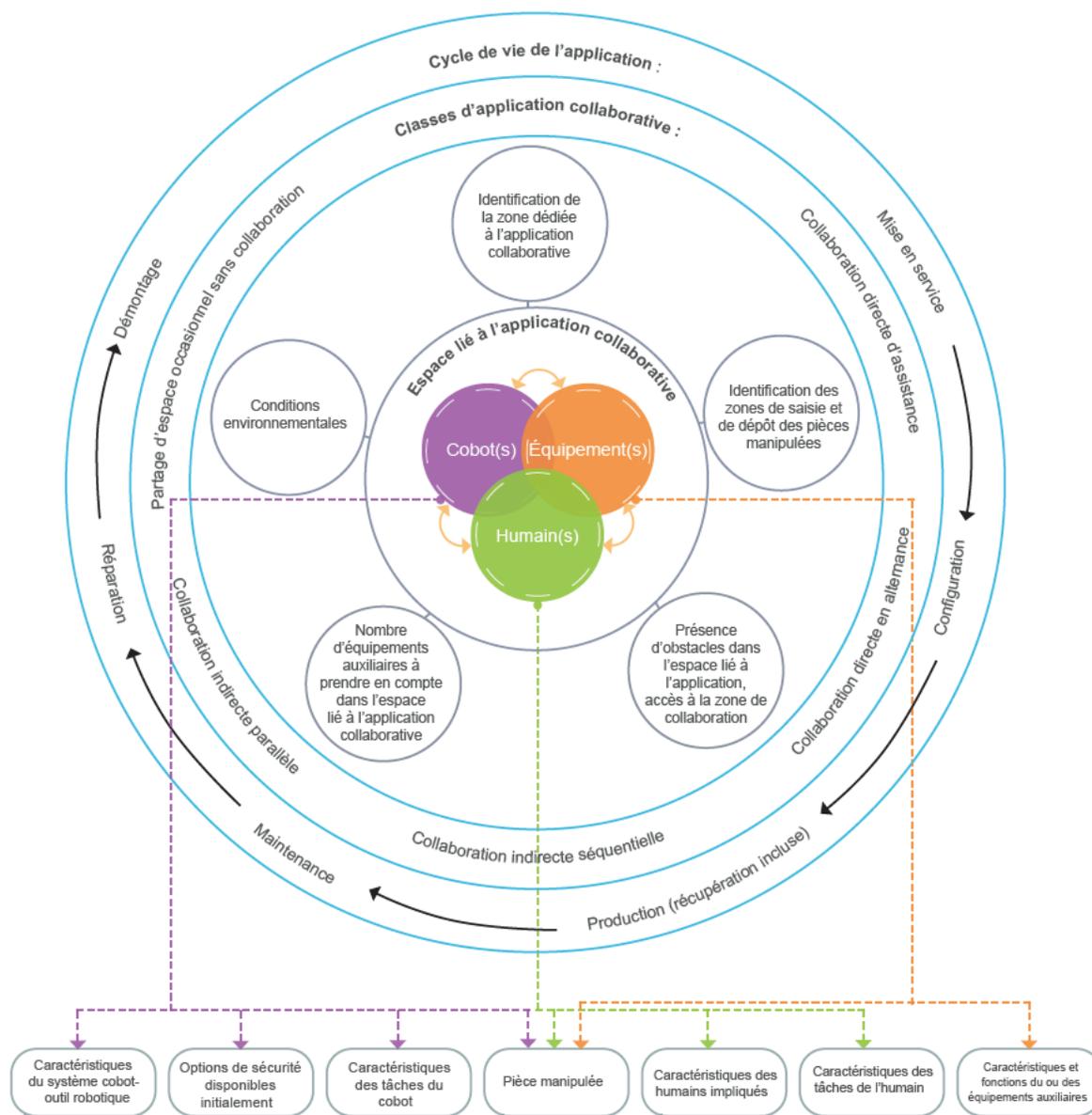
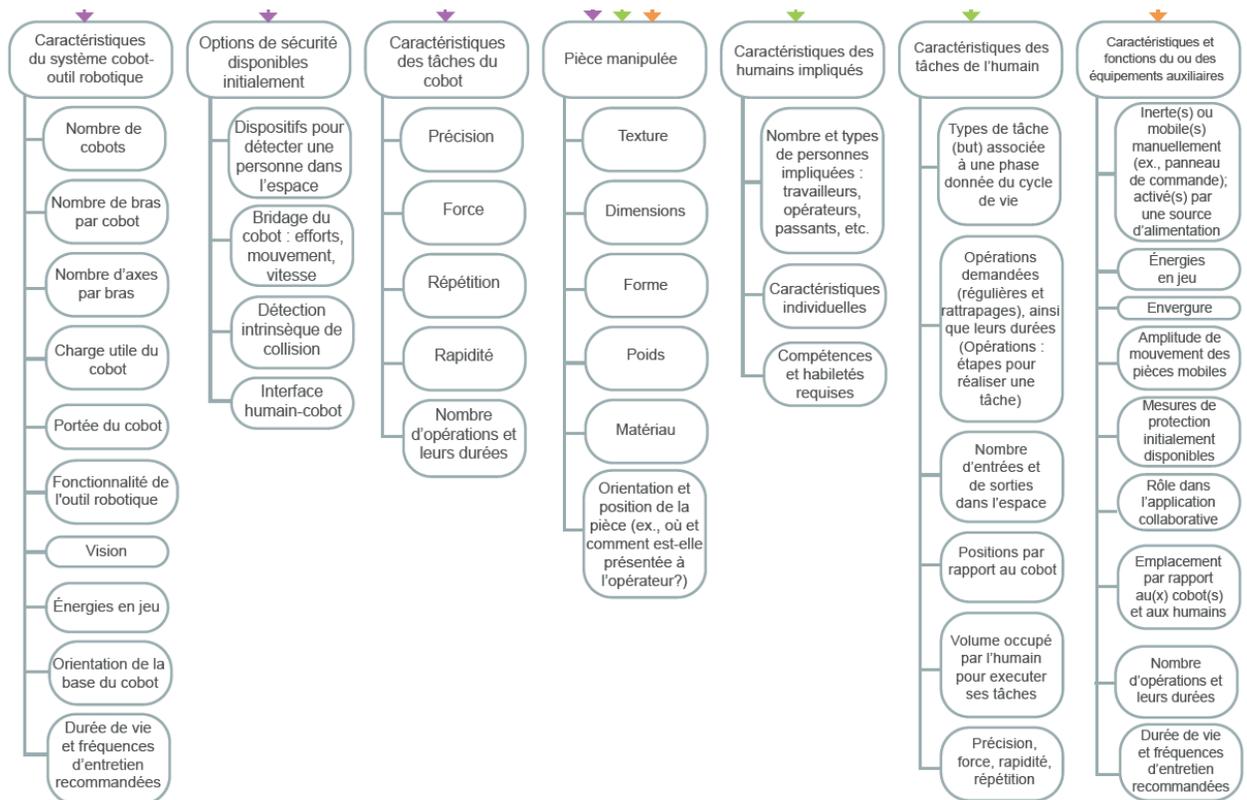


Figure 29. Facteurs de variabilité influençant le processus d'intégration (partie 2).



Ensuite, la figure 28 et la figure 29 cartographient les limites de temps, d'utilisation, d'espace et autres à considérer en adéquation avec la première étape de l'analyse de risque :

- Les limites d'utilisation comprennent la détermination de la classe de l'application collaborative et les spécifications du cobot (« Caractéristiques du système cobot-outil robotique » et « Options de sécurité disponibles initialement »), les caractéristiques et les fonctions de l'équipement auxiliaire et le travail à effectuer (« Caractéristiques des tâches du cobot » et « Caractéristiques des tâches de l'humain »), ainsi que les caractéristiques des humains concernés par l'application collaborative. La norme ISO 12100 (ISO, 2010a) stipule que les personnes qui utiliseront la machine doivent être identifiées, y compris leur sexe, leur âge, leurs handicaps potentiels et leur main dominante. Selon Lee *et al.* (2021), « les facteurs personnels des opérateurs, qui ont été négligés dans les évaluations des risques jusqu'à présent, doivent être inclus dans les futures évaluations des risques liés aux opérations robotiques ». Par conséquent, l'inclusion de la branche « Caractéristiques des humains impliqués » est tout à fait appropriée pour cet outil qui vise à aider les intégrateurs en cobotique qui ont besoin de démarrer leur processus d'appréciation des risques. Les humains en question sont ceux impliqués dans la phase du cycle de vie pour laquelle l'appréciation du risque est effectuée. Par exemple, lors de la mise en service, l'humain à protéger sera l'équipe d'intégration avec son effectif, ses compétences et habiletés (p. ex. formation en sécurité des machines). Par ailleurs, lors d'une phase comme la

production, les humains à considérer seront les opérateurs, les travailleurs avoisinants et autres passants, avec leurs caractéristiques encore une fois.

- Les limites d'espace correspondent principalement à la branche circulaire « Espace lié à l'application collaborative » et à ses feuilles (figure 28). Les feuilles telles que « Portée du cobot », « Positions par rapport au cobot », « Volume occupé par l'humain pour réaliser ses tâches », « Amplitude de mouvement des pièces mobiles », « Emplacement par rapport au(x) cobot(s) et aux humains » affectent également les limites associées à l'espace.
- Les limites temporelles correspondent principalement au cercle « Cycle de vie de l'application » et à certaines cases de l'outil qui prennent en compte la durée des opérations du cobot, de l'humain et de l'équipement. Même si le trio « Cobot(s)-Humain(s)-Équipement(s) » est au cœur de la détermination des limites, l'une des premières limites à examiner est la suivante : « Pour quelles phases du cycle de vie du système robotique lançons-nous l'évaluation des risques ? »
- Les autres limites correspondent principalement aux cellules « Conditions environnementales » et « Matériels ».

CONCLUSION

Cette étude exploratoire consiste à identifier, en laboratoire, les éléments essentiels au processus d'intégration sécuritaire de cellules cobotiques, en considérant les variabilités inhérentes à la tâche à cobotiser et à l'intégrateur. Nous avons constaté que parmi tous les éléments de variabilité influençant les quatre processus d'intégration étudiés, les trois premiers éléments suivants liés à la tâche à cobotiser et les deux derniers éléments suivants associés à l'intégrateur étaient essentiels dans ces processus :

- Le choix du cobot puisqu'il a eu une influence sur la précision de la tâche à réaliser, sur la gestion du risque, notamment le risque de collision, ainsi que sur l'organisation de la cellule cobotique (c.-à-d., où se trouve l'humain et les équipements auxiliaires par rapport à l'élément « cobot »). D'ailleurs, à ce sujet, il aurait été enrichissant d'observer en quoi la variabilité liée au nombre de bras d'un cobot impacte le processus d'intégration. Rappelons que les processus d'intégration étudiés traitaient uniquement de cobots monobras. Il s'agit donc d'une limite de l'étude induite, dès le départ, par les contraintes budgétaires.
- Le type de pièce à manipuler ou à travailler et le type d'outil robotique puisqu'ils impactent grandement la sécurisation de la cellule, notamment l'utilisation de dispositifs de sécurité externes et même la vocation collaborative de l'application, dans le sens où le cobot n'est pas à l'arrêt lorsqu'une personne approche.
- Les contraintes de temps de cycle et de productivité puisqu'ils impactent la vitesse de déplacement imposée au cobot et, conséquemment, la sécurité de l'opérateur devant composer avec cette vitesse (d'où l'importance d'adapter l'application collaborative dans son ensemble à l'opérateur et non l'inverse. En choisissant une vitesse inadaptée à l'opérateur, sa performance au travail sera diminuée, ce qui affectera la productivité globale du système opérateur-cobot, même si le cobot reste productif de son côté). Des choix technologiques adaptés, comme expliqué plus loin, ainsi qu'une réattribution réfléchie et efficace des tâches entre le cobot et l'humain pour mettre à profit leurs meilleurs atouts constitueraient des avenues à considérer pour surmonter les défis qui gênent la productivité. Rappelons que ces atouts consistent par exemple en la précision du cobot, puis en la capacité de l'humain à s'adapter fluidement aux aléas d'un procédé et en sa capacité de prendre des décisions en situation ambiguë.
- La formation de l'intégrateur en programmation en robotique, mais aussi en sécurité des machines et en sécurité robotique, puisque le niveau de formation influence son processus de résolution de problèmes et ses choix impactant la sécurité ou la productivité. Le manque de considération, par les intégrateurs observés, des contraintes physiques sur le corps humain soulève la nécessité qu'au moins un membre de l'équipe d'intégration possède des connaissances suffisantes en ergonomie.
- Les informations relatives à la sécurité ou à la productivité que les intégrateurs reçoivent de leur entourage, puisqu'elles les poussent à remettre en question leurs choix initiaux et les corriger s'il y a lieu (il s'agit ici de l'influence de ce collectif, au-delà des connaissances de l'intégrateur).

Les résultats relatifs aux processus d'intégration ont été obtenus sur un échantillon réduit : deux intégrateurs mettant chacun en œuvre deux applications collaboratives, dans un contexte de laboratoire lié à la SST. L'étude serait aussi limitée par l'expertise d'un des deux intégrateurs qui possédaient des niveaux d'expériences différents. En effet, l'intégrateur 1 consistait en une équipe professionnelle habituée à des intégrations industrielles. En revanche, le second était un étudiant de maîtrise déjà spécialisé en automatisation, mais manquant d'expérience professionnelle en intégration de systèmes robotiques ; il a donc bénéficié de la supervision de ses directeurs de maîtrise. L'approche de la sécurité adoptée par ces deux intégrateurs était différente. Dans un cas, l'intégrateur professionnel (c'est-à-dire l'intégrateur 1) a utilisé des normes canadienne et internationale et procédé à une analyse formelle des risques vers la fin de l'intégration, tandis que l'intégrateur 2 a utilisé des normes internationales en formalisant son analyse des risques très tôt dans son processus d'intégration.

Le nombre assez limité d'applications collaboratives et d'intégrateurs ne permet pas d'aboutir à une recherche exhaustive. Compte tenu de l'importance des ressources nécessaires pour créer de nouvelles d'applications collaboratives et faire en sorte que chacune d'entre elles soit créée par plusieurs intégrateurs, cette étude constitue un point de départ tout à fait convenable pour explorer les principaux concepts à prendre en compte pour l'intégration d'applications collaboratives. Alors, cette étude se concentre à juste titre sur la documentation des processus techniques, créatifs et cognitifs associés à la mise en œuvre d'une nouvelle cellule cobotique. En se concentrant sur les tâches des intégrateurs, et non sur celles de l'opérateur de la cellule cobotique lui-même, l'étude est en mesure de mettre en lumière certains concepts généraux et idées générales nécessaires aux tâches d'intégration. C'est la raison pour laquelle l'étude peut être transposée, voire généralisée pour l'intégration d'autres cellules cobotiques, même si le travail n'a été effectué que dans un environnement de laboratoire contrôlé. En effet, le retour d'expérience présenté, les processus documentés aideront certainement la conception et l'intégration de cellules cobotiques en entreprise. Par exemple, à la lumière de ces quatre processus d'intégration, nous jugeons qu'il est acceptable qu'une appréciation formelle des risques (c.-à-d. conformément au cadre normatif) ne se construise pas avant d'avoir une première idée de l'installation. Toutefois, dès que l'emplacement des divers équipements par rapport aux humains concernés est déterminé, même de manière préliminaire, nous croyons qu'il est nécessaire que l'appréciation des risques se formalise au sens des normes en vigueur en sécurité des machines. Indépendamment de sa forme, il est essentiel que le processus d'appréciation du risque débute dès les premières réflexions sur l'application.

Pour démarrer cette appréciation des risques, ce rapport a proposé un outil servant d'aide-mémoire. Il s'agit de l'outil de la section 6.4 pour réaliser la première étape de l'appréciation des risques : la détermination des limites de l'application collaborative. Une étape subséquente à ce projet serait d'étudier l'usage de cet outil par des intégrateurs en contexte réel d'entreprise. Par exemple, selon un contexte d'intégration avec des équipements existants ou de nouveaux équipements permettant une grande flexibilité.

Cette figure consiste donc en un premier accomplissement de la méthode ou de l'outil générique souhaité à long terme et annoncé à la section 1.3 pour gérer les risques des applications collaboratives.

À la lumière des constats discutés, il sera important que l'outil générique complet tienne compte du triangle « sécurité-productivité-santé » que l'intégrateur aura à considérer lors des boucles itératives de son processus de mise en œuvre, boucles découlant entre autres de la recherche de compromis entre ces trois points. L'outil générique complet viendrait en complément au processus itératif de réduction du risque que propose l'ISO 12100 (ISO, 2010a) en sécurité des machines. La norme demande d'itérer ce processus en guise de vérification de l'efficacité de la mesure de réduction du risque choisie ou pour le suivi du risque. Après l'ajout de chaque mesure de réduction du risque, il faut vérifier si un risque est créé ou a fluctué. Si c'est le cas, il faudra vérifier l'acceptabilité de ce risque. Si le risque est inacceptable, il faudra le réduire. À la lumière des quatre intégrations observées et des constats, l'outil générique complet visé rappellerait qu'une itération est requise après chaque décision relative à la sécurité, mais aussi après chaque décision relative à la productivité et à la santé, pour constamment s'assurer que les choix d'intégration répondent au cahier des charges, dans le respect de la sécurité et de la santé de l'opérateur.

À propos de la santé, nous avons noté que les quatre processus d'intégration étudiés considéraient très peu les contraintes physiques et psychosociales que pourrait subir l'opérateur. Une autre étude subséquente serait d'impliquer des sujets humains pour évaluer, par exemple, le risque de TMS sur la santé de l'opérateur, lors du fonctionnement normal des cellules cobotiques de ce rapport. Cette évaluation permettrait ultimement de proposer des façons de faire ou des mesures de réduction du risque de TMS dès la conception de la cellule cobotique. Toujours à propos de la santé, la constatation à la section 1 qu'il arrive souvent que l'opérateur change de tâche et devienne le superviseur du cobot peut nous pousser à nous interroger sur l'effet de ce choix sur sa santé mentale quand cette décision lui a été imposée et provoque une perte de sens dans son travail. Il en va de même pour le travailleur tiers (donc pas nécessairement l'opérateur du cobot) de l'application « Moteur » qui aura à préparer les matrices de vis. Il s'agit d'une tâche lassante pour un travailleur et qui pourrait peut-être gagner à être automatisée grâce à des algorithmes de reconnaissances d'image. Aidés d'une caméra de scène, ces algorithmes permettraient au robot d'identifier la vis à saisir parmi d'autres en vrac, puis en ordonneraient la prise pour la tendre à l'opérateur. Sachant qu'une perte de motivation peut altérer la productivité, l'intégrateur aura un rôle capital à jouer auprès du demandeur d'ouvrage pour trouver un compromis acceptable du triangle « sécurité-productivité-santé ». L'intégrateur devra expliquer au demandeur d'ouvrage l'importance ou l'avantage pour celui-ci et pour l'opérateur d'impliquer ce dernier en amont du processus de mise en œuvre de l'application collaborative. Rappelons que cette implication permettra, d'une part, au demandeur d'ouvrage d'exploiter le fait que l'opérateur soit le mieux placé pour aider à reconcevoir le travail futur qui se fera en interaction avec le cobot. D'autre part, cette implication favorisera l'adhésion de l'opérateur aux changements apportés dans son

travail. L'impact du niveau d'implication de l'opérateur sur sa santé mentale pourrait être approfondi dans une étude de recherche subséquente sur les applications collaboratives.

Enfin, toujours en lien avec le triangle « sécurité-productivité-santé », il serait judicieux à l'avenir d'étudier les stratégies capables de repousser les frontières rattachées à ces trois sommets de compromis. Pour reprendre l'exemple de l'application « Moteur », il serait judicieux d'étudier si l'exploitation d'avancées technologiques, permettant de prémunir le travailleur de tâches à peu de valeur ajoutée, permettrait du même coup d'améliorer la productivité en général (p. ex. coût total d'un travailleur qui prépare les matrices versus coût total d'un cobot qui saisit les vis en vrac).

BIBLIOGRAPHIE

- Aaltonen, I. et Salmi, T. (2019). Experiences and expectations of collaborative robots in industry and academia: Barriers and development needs. *Procedia Manufacturing*, 38, 1151-1158. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.204>
- Aldinhas Ferreira, M. I. et Fletcher, S. R. (édit.) (2022). *The 21st century industrial robot: When tools become collaborators*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-78513-0>
- American National Standards Institute/American Society of Safety Engineers. (2011). *Risk assessment techniques*. Norme ANSI/ASSE Z690.3.
- Andersson, S. K. L., Granlund, A., Hedelind, M. et Bruch, J. (2020). Exploring the capabilities of industrial collaborative robot applications. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 13, 109-118. <https://doi.org/10.3233/ATDE200148>
- Association canadienne de normalisation. (2016). *Safeguarding of machinery*. Norme CSA Z432-16.
- Association canadienne de normalisation. (2019). *Industrial robots and robot systems*. Norme CSA Z434-14 (R2019).
- Atain Kouadio, J.-J., Sghaier, A. et Picot, D. (2015). *Les robots d'assistance physique : fonctionnement, utilisation en industrie et enjeux santé et sécurité au travail* [Communication]. 50^e congrès de la Société d'ergonomie de langue française (SELF), Paris, France (p. 560-567).
- Bauer, W. (édit.), Bender, M., Braun, M., Rally, P. et Scholtz, O. (2016). *Lightweight robots in manual assembly: Best to start simply! Examining companies' initial experiences with lightweight robots*. Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO. <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/961b5036-c442-47db-84a6-b5334b4c1221/content>
- Bejarano, R., Ferrer, B. R., Mohammed, W. M. et Martinez Lastra, J. L. (2019). *Implementing a human-robot collaborative assembly workstation* [Communication]. IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Helsinki, Finlande (p. 557-564). <https://doi.org/10.1109/INDIN41052.2019.8972158>
- Berx, N., Decré, W. et Pintelon, L. (2022). Examining the role of safety in the low adoption rate of collaborative robots. *Procedia CIRP*, 106, 51-57. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.154>
- Bi, Z. M., Luo, C., Zhonghua, M., Zhang, B., Zhang, W. J. et Wang, L. (2021). Safety assurance mechanisms of collaborative robotic systems in manufacturing. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 67, article 102022. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102022>
- Bounouar, M., Bearee, R., Siadat, A, Klement, N. et Benchekroun, T.-H. (2020, 16-19 avril). *User-centered design of a collaborative robotic system for an industrial recycling operation* [Communication]. Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET), Meknes, Maroc. <https://doi.org/10.1109/iraset48871.2020.9092178>
- Brun, L. et Wioland, L. (2010). Prevention of occupational risks related to the human-robot collaboration. Dans T. Ahram, R. Taiar, K. Langlois et A. Choplin (édit.), *Human*

- interaction, emerging technologies and future applications III: Proceedings of the 3rd International Conference on Human Interaction and Emerging Technologies: Future applications (IHET 2020), August 27-29, 2020, Paris, France* (p. 441-446). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55307-4_67
- Can Görür, O., Rosman, B., Sivrikaya, F. et Albayrak, S. (2022). FABRIC: A framework for the design and evaluation of collaborative robots with extended human adaptation. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction*, 12(3), article 38. <https://doi.org/10.1145/3585276>
- Cencen, A., Verlinden, J. et Geraedts, J. (2015). Characterizing the state of the art of human-robot coproduction. Dans A. Tapus, E. André, J. C. Martin, F. Ferland et M. Ammi (édit.), *Social Robotics. 7th International Conference, ICSR 2015, Paris, France, October 26-30, 2015, Proceedings* (p. 135-144). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25554-5_14
- Chalandon, X. (2007). *Conscience de la situation : invariants internes et invariants externes* (Thèse de doctorat, Conservatoire national des arts et métiers). <https://hal.science/hal-00824020/document>
- Charpentier, P. et Sghaier, A. (2012, 11-12 octobre). *Industrial robotic: Accident analysis and human-robot coactivity* [Communication]. 7th International Conference on the Safety of Industrial Automated Systems (SIAS), Montréal, QC (p. 170-175). <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/SIAS-2012.pdf>
- Chemweno, P., Pintelon, L. et Decre, W. (2020). Orienting safety assurance with outcomes of hazard analysis and risk assessment: A review of the ISO 15066 standard for collaborative robot systems. *Safety Science*, 129, article 104832. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104832>
- Chinniah, Y., Gauthier, F., Lambert, S. et Moulet, F. (2011). *Analyse expérimentale des outils d'estimation du risque associé aux machines industrielles* (Rapport n° R-697). IRSST. <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-697.pdf?v=2024-03-01>
- Colim, A., Faria, C., Cunha, J., Oliveira, J., Sousa, N. et Rocha, L. A. (2021). Physical ergonomic improvement and safe design of an assembly workstation through collaborative robotics. *Safety*, 7(1), article 14. <https://doi.org/10.3390/safety7010014>
- Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (2017). *Sécurité des machines : phénomènes, situations, événements dangereux et dommages* (Guide technique n° DC200-1581). <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2932301>
- Correia Simões, A., Pinto, A., Santos, J., Pinheiro, S. et Romero, D. (2022). Designing human-robot collaboration (HRC) workspaces in industrial settings: A systematic literature review. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 28-43. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.11.007>
- Cunha, J. G., Faria, C., Colim, A., Oliveira, J., Rocha, L. A., Silva, M., Monteiro, S. et Bicho, E. (2021, 4-6 mars). *From handcrafting to a certified and ergonomic collaborative workstation: The digital transformation process* [Communication]. IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR), Nagoya, Japon (p. 363-366). <https://doi.org/10.1109/ISR50024.2021.9419376>

- Daniellou, F. (2004). L'ergonomie dans la conduite de projet de conception de système de travail. Dans P. Falzon (édit.), *Ergonomie* (p. 359-374). Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.falzo.2004.01.0359>
- Darses, F., Détienne, F. et Visser, W. (2004). Les activités de conception et leur assistance. Dans P. Falzon (édit.), *Ergonomie* (p. 545-563). Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.falzo.2004.01.0545>
- Di Marino, C., Rega, A., Vitolo, F. et Patalano, S. (2023). *Enhancing human-robot collaboration in the industry 5.0 context: Workplace layout prototyping*. Dans S. Gerbino, A. Lanzotti, M. Martorelli, R. M. Buil, C. Rizzi et L. Roucoules (édit.), *Advances on mechanics, design engineering and manufacturing IV: Proceedings of the International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing, Ischia, Italie* (p. 454-465). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15928-2_40
- Fonds de recherche du Québec. (2019). *Plan stratégique 2018-2022*. FRQ. https://frq.gouv.qc.ca/app/uploads/2021/04/plan-strategique_2018-2022-frqsc_vf.pdf
- Fryman, J., Arbor, A. et Matthias, B. (2012, 11-12 octobre). *Robotic industries association, safety of industrial robots: From conventional to collaborative applications* [Communication]. 7th International Conference on the Safety of Industrial Automated Systems (SIAS), Montréal, QC (p.198-203). <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/SIAS-2012.pdf>
- Gauthier, F., Chinniah, Y., Bulet-Vienney, D., Aucourt, B. et Larouche, S. (2016). *Sécurité des machines : expérimentation pratique de paramètres et d'outils d'estimation du risque* (Rapport n° R-940). IRSST. <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-940.pdf>
- Gervasi, R., Mastrogiacomo, L. et Franceschini, F. (2022). *Human-robot collaboration in a repetitive assembly process: A preliminary investigation on operator's experience and product quality outputs* [Communication]. 5th International Conference on Quality Engineering and Management (ICQEM), Minho, Portugal (p. 72-92). https://publicacoes.rigual.org/wp-content/uploads/2022/08/icqem_22_72_92.pdf
- Gouvernement du Canada. (2020). *Grappe de la fabrication de pointe du Canada*. <https://ised-isde.canada.ca/site/grappes-dinnovation-mondiales/fr/grappe-fabrication-pointe-canada>
- Gouvernement du Canada. (2021). *À propos des Grappes d'innovation mondiales du Canada*. <https://ised-isde.canada.ca/site/grappes-dinnovation-mondiales/fr/propos-grappes-dinnovation-mondiales-canada>
- Gualtieri, L., Fraboni, F., De Marchi, M. et Rauch, E. (2022). Development and evaluation of design guidelines for cognitive ergonomics in human-robot collaborative assembly systems. *Applied Ergonomics*, 104, article 103807. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103807>
- Gualtieri, L., Rauch, E. et Vidoni, R. (2022). Development and validation of guidelines for safety in human-robot collaborative assembly systems. *Computers & Industrial Engineering*, 163, article 107801. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107801>
- Gualtieri, L., Rauch, E. et Vidoni, R. (2023). Human-robot activity allocation algorithm for the redesign of manual assembly systems into human-robot collaborative assembly. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 36(2), 308-333. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2083687>

- Gualtieri, L., Rauch, E., Vidoni, R. et Matt, D. T. (2019). An evaluation methodology for the conversion of manual assembly systems into human-robot collaborative workcells. *Procedia Manufacturing*, 38, 358-366. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.046>
- Gustavsson Christiernin, L. (2017). *How to describe interaction with a collaborative robot*. Dans B. Mutlu et M. Tscheligi (édit.), *HRI » 17 : ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, Vienna, Austria, March 6-9, 2017* (p. 93-94). ACM. <https://doi.org/10.1145/3029798.3038325>
- Henley, J. (24 juillet 2022). Chess robot grabs and breaks finger of seven-year-old opponent. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/sport/2022/jul/24/chess-robot-grabs-and-breaks-finger-of-seven-year-old-opponent-moscow>
- Hentout, A., Aouache, M., Maoudj, A. et Akli, I. (2019). Human-robot interaction in industrial collaborative robotics: A literature review of the decade 2008-2017. *Advanced Robotics*, 33 (15-16), 764-799. <https://doi.org/10.1080/01691864.2019.1636714>
- International Federation of Robotics (2022). *World robotics 2022* [Présentation PowerPoint]. IFR. [https://ifr.org/downloads/press2018/2022 WR show version.pdf](https://ifr.org/downloads/press2018/2022_WR_show_version.pdf)
- Jocelyn, S., Burette-Vienney, D., Giraud, L. et Sghaier, A. (2017). *Robotique collaborative : évaluation des fonctions de sécurité et retour d'expérience des travailleurs, utilisateurs et intégrateurs au Québec* (Rapport n° R-974). IRSST. <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-974.pdf>
- Kildal, J., Molina, J. et Andrés, U. (2022). User-centred human-robot collaborative handling of small parts in a MIM process. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 25, 113-118. <https://doi.org/10.3233/ATDE220576>
- Knol, A. B., Slottje, P., vander Sluijs, J. P. et Leuret, E. (2010). The use of expert elicitation in environmental health impact assessment: A seven step procedure. *Environmental Health*, 9, article 19. <https://doi.org/10.1186/1476-069x-9-19>
- Kolbeinsson, A., Lagerstedt, E. et Lindblom, J. (2019). Foundation for a classification of collaboration levels for human-robot cooperation in manufacturing. *Production & Manufacturing Research*, 7(1), 448-471. <https://doi.org/10.1080/21693277.2019.1645628>
- Koppenborg, M., Nickel, P., Naber, B., Lungfiel, A. et Huelke, M. (2017). Effects of movement speed and predictability in human-robot collaboration. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 27(4), 197-209. <https://doi.org/10.1002/hfm.20703>
- Krüger, J., Lien, T. K. et Verl, A. (2009). Cooperation of human and machines in assembly lines. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 58, 628-646. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.009>
- Lavit Nicora, M., André, E., Berkman, D., Carissoli, C., D'Orazio, T., Delle Fave, A., . . . Malosio, M. (2021). *A human-driven control architecture for promoting good mental health in collaborative robot scenarios* [Communication]. 30th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN), Vancouver, BC (p. 285-291). <https://doi.org/10.1109/RO-MAN50785.2021.9515315>
- Lee, K., Shin, J. et Lim, J.-Y. (2021). Critical hazard factors in the risk assessments of industrial robots: Causal analysis and case studies. *Safety and Health at Work*, 12(4), 496-504. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2021.07.010>

- Main, B. W. (2004). *Risk assessment: Basics & benchmarks*. Design Safety Engineering.
- Malm, T., Viitaniemi, J., Latokartano, J., Lind, S., Venho-Ahonen, O. et Schabel, J. (2010). Safety of interactive robotics: Learning from accidents. *International Journal of Social Robotics*, 2, 221-227. <https://doi.org/10.1007/s12369-010-0057-8>
- Matheson, E., Minto, R., Zampieri, E. G. G., Faccio, M. et Rosati, G. (2019). Human-robot collaboration in manufacturing applications: A review. *Robotics*, 8(4), article 100. <http://dx.doi.org/10.3390/robotics8040100>
- Michalos, G., Makris, S., Tsarouchi, P., Guasch, T., Kontovrakis, D. et Chryssolouris, G. (2015). Design considerations for safe human-robot collaborative workplaces. *Procedia CIRP*, 37, 248-253. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.014>
- Moulières-Seban, T. (2017). *Conception de systèmes cobotiques industriels : approche cognitive : application à la production pyrotechnique au sein d'Ariane Group* (Thèse de doctorat, Université de Bordeaux). <https://theses.hal.science/tel-01697610v1/document>
- Nelson Shea, R. (15 juillet 2022). The recent chess robot incident should never have happened [Billet de blogue]. <https://www.universal-robots.com/blog/the-recent-chess-robot-incident-should-never-have-happened/>
- Organisation internationale de normalisation. (2010a). *Safety of machinery: General principles for design: Risk assessment and risk reduction*. Norme ISO 12100.
- Organisation internationale de normalisation. (2010b). *Sécurité des machines : positionnement des moyens de protection par rapport à la vitesse d'approche des parties du corps*. Norme ISO 13855.
- Organisation internationale de normalisation. (2011a). *Robots and robotic devices: Safety requirements for industrial robots. Part 1: Robots*. Norme ISO 10218-1.
- Organisation internationale de normalisation. (2011b). *Robots and robotic devices: Safety requirements for industrial robots. Part 2: Robot systems and integration*. Norme ISO 10218-2.
- Organisation internationale de normalisation. (2015). *Sécurité des machines : parties des systèmes de commande relatives à la sécurité. Partie 1 : principes généraux de conception*. Norme ISO 13849-1.
- Organisation internationale de normalisation. (2016). *Robots and robotic devices: Collaborative robots*. Spécification technique ISO/TS 15066.
- Organisation internationale de normalisation. (2018). *Robotics: Safety design for industrial robot systems. Part 1: End-effectors*. Rapport technique ISO TR 20218-1.
- Organisation internationale de normalisation. (2023). *Robotics: Safety requirements for robot systems in an industrial environment. Part 2: Robot systems, robot applications and robot cells integration*. Brouillon de la norme ISO 10218-2.
- Règlement sur la santé et la sécurité du travail du Québec*, RLRQ, c. S-2.1, r. 13
- Quenehen, A., Klement, N., Abdeljaouad, A. M., Roucoules, L. et Gibaru, O. (2022). Economic and ergonomic performance enhancement in assembly process through multiple collaboration modes between human and robot. *International Journal of Production Research*, 61(5), 1-15. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2039795>

- Realyvásquez-Vargas, A., Cecilia Arredondo-Soto, K., Luis García-Alcaraz, J., Yail Márquez-Lobato, B. et Cruz-García, J. (2019). Introduction and configuration of a collaborative robot in an assembly task as a means to decrease occupational risks and increase efficiency in a manufacturing company. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 57, 315-328. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.12.015>
- Rega, A., Di Marino, C., Pasquariello, A., Vitolo, F., Patalano, S., Zanella, A. et Lanzotti, A. (2021). Collaborative workplace design: A knowledge-based approach to promote human-robot collaboration and multi-objective layout optimization. *Applied Sciences*, 11, article 12147. <https://doi.org/10.3390/app112412147>
- Rosen, P. H., Heinold, E., Friestersch, E. et Wischniewski, S. (2022). *Advanced robotics and automation: Implications for occupational safety and health*. EU-OSHA. <https://osha.europa.eu/en/publications/advanced-robotics-and-automation-implications-occupational-safety-and-health>
- Rossato, C., Orso, V., Pluchino, P. et Gamberini, L. (2021). *Adaptive assembly workstations and cobots: A qualitative assessment involving senior and adult workers* [Communication]. European Conference on Cognitive Ergonomics, New-York, NY (article 23). <https://doi.org/10.1145/3452853.3452883>
- Schoen, A., White, N., Henrichs, C., Siebert-Evenstone, A., Shaffer, D. et Mutlu, B. (2022). *CoFrame: A system for training novice cobot programmers* [Communication]. ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), Sapporo, Japon (p. 185-194). <https://doi.org/10.1109/HRI53351.2022.9889345>
- Scholtz, J. C. (2002). Human-robot interactions: Creating synergistic cyber forces. Dans A. C. Schultz et L. E. Parker (édit.), *Multi-robot systems: From swarms to intelligent automata* (p. 177-184). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2376-3_19
- Sheridan, T. B. (2016). Human-robot interaction: Status and challenges. *Human Factors and Ergonomics Society*, 58(4), 525-532. <https://doi.org/10.1177/0018720816644364>
- Siebert-Evenstone, A., Michaelis, J. E., Shaffer, D. W. et Mutlu, B. (2021). Safety first: Developing a model of expertise in collaborative robotics. Dans A. R. Ruis et S. B. Lee (édit.), *Advances in quantitative ethnography (ICQE 2021)* (p. 304-318). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67788-6_21
- Simmonds, P., Brown, N. et Rentel, M. (2017). *Evaluation of directive 2006/42/EC on machinery*. Technopolis Group. http://www.industry-finder.com/download/2006-42-ce-machinery-directive/mandats-CE/Evaluation-of-Directive-2006_42_EC-on-Machinery-Final-Report-September-2017.pdf
- St-Vincent, M., Vézina, N., Bellemare, M., Denis, D., Ledoux, E. et Imbeau, D. (2011). *L'intervention en ergonomie*. Éditions MultiMondes. https://bibliotheques.wallonie.be/doc_num.php?explnum_id=6492
- Tihay, D. (2018). Robotique collaborative : perception et attentes des industriels. *Hygiène et sécurité du travail*, (250), 50-57. <https://www.inrs.fr/media.html?reflNRS=NT%2058>
- Visser, W. (2002). Conception individuelle et collective : approche de l'ergonomie cognitive. Dans M. Borillo et J.-P. Goulette (édit.), *Cognition et création : explorations cognitives des processus de conception* (p. 311-327). Mardaga. <https://inria.hal.science/inria-00186284v1/document>

- Weichhart, G. (2018). Representing processes of human robot collaboration. Dans S. Oppl, (édit.), *Proceedings of the workshops subject-orientation in digitalization and community support, and work-in-progress contributions at S-BPM ONE 2018, Linz, Austria, April 5th to 6th, 2018*. CEUR-WS. https://ceur-ws.org/Vol-2074/article_2.pdf
- Xiao, M. (2021). The collaborative robot market 2021-28: Grounds for optimism after a turbulent two years. *Robotics Tomorrow*. <https://www.roboticstomorrow.com/article/2021/02/the-collaborative-robot-market-2021%E2%80%9328-grounds-for-optimism-after-a-turbulent-two-years/16190>