



HAL
open science

**Conception de systèmes cobotiques industriels :
approche robotique avec prise en compte des facteurs
humains : application à l'industrie manufacturière au
sein de Safran et ArianeGroup**

David Bitonneau

► **To cite this version:**

David Bitonneau. Conception de systèmes cobotiques industriels : approche robotique avec prise en compte des facteurs humains : application à l'industrie manufacturière au sein de Safran et ArianeGroup. Automatique / Robotique. Université de Bordeaux, 2018. Français. NNT : 2018BORD0069 . tel-01897527

HAL Id: tel-01897527

<https://theses.hal.science/tel-01897527>

Submitted on 17 Oct 2018

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

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

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

École Doctorale Sciences Physiques et de l'Ingénieur
Automatique, Productique, Signal et Image, Ingénierie Cognitive
Spécialité Robotique

Par **David BITONNEAU**

**Conception de systèmes cobotiques industriels
Approche robotique avec prise en compte des facteurs humains
Application à l'industrie manufacturière au sein de Safran et ArianeGroup**

Sous la direction de Bernard CLAVERIE et Olivier LY

Soutenue le 25 mai 2018 à l'ENSC

Membres du jury :

M. GARRIGOU, Alain	Professeur des Universités – Université de Bordeaux	Président
M. BLAZEVIC, Pierre	Professeur des Universités – Université de Versailles St. Quentin-en-Yvelines	Rapporteur
M. CHAUDRON, Laurent	Directeur de Recherche – ONERA	Rapporteur
M. GUETTIER, Christophe	Safran Electronics & Defense	Examineur
M. CLAVERIE, Bernard	Professeur des Universités – IMS, ENSC Bordeaux INP	Directeur de thèse
M. LY, Olivier	Maître de Conférences – Université de Bordeaux	Co-directeur de thèse
M. THIBAUT, Jean-François	Responsable du Programme Ergonomie – Safran	Tuteur industriel
M. LE HELLEY, Philippe	Responsable de l'Ingénierie du Cluster Propulsion Solide – ArianeGroup	Membre invité

Cette thèse a été réalisée en binôme avec Théo MOULIÈRES-SEBAN

Résumé

La cobotique est un domaine émergeant qui offre de nouvelles perspectives pour améliorer la performance des entreprises et la santé des hommes au travail, en alliant l'expertise et les capacités cognitives des opérateurs aux atouts des robots. Dans cette thèse la cobotique est positionnée comme le domaine de la collaboration homme-robot. Nous définissons les systèmes cobotiques comme des systèmes au sein desquels l'homme et le robot interagissent pour réaliser une tâche commune.

Cette thèse d'ingénierie robotique a été réalisée en binôme avec Théo Moulières-Seban, doctorant en cognitive. Ces deux thèses Cifre ont été menées avec Safran et ArianeGroup qui ont reconnu la cobotique comme stratégique pour le développement de leur compétitivité. Pour étudier et développer les systèmes cobotiques, nous avons proposé conjointement une approche méthodologique interdisciplinaire appliquée à l'industrie et validée par nos encadrants académiques. Cette approche offre une place centrale à l'intégration des futurs utilisateurs dans la conception, à travers l'analyse de leur activité de travail et la réalisation de simulations participatives. Nous avons déployé cette démarche pour répondre à différents besoins industriels concrets chez ArianeGroup.

Dans cette thèse, nous détaillons la conception d'un système cobotique pour améliorer la santé et la sécurité des opérateurs sur le poste de nettoyage des cuves de propergol. Les opérations réalisées sur ce poste sont difficiles physiquement et présentent un risque pyrotechnique. Conjointement avec l'équipe projet ArianeGroup, nous avons proposé un système cobotique de type téléopération pour conserver l'expertise des opérateurs tout en les plaçant en sécurité pendant la réalisation des opérations pyrotechniques. Cette solution est en cours d'industrialisation dans la perspective de la production du propergol des fusées Ariane.

L'application de notre démarche d'ingénierie des systèmes cobotiques sur une variété de postes de travail et de besoins industriels nous a permis de l'enrichir avec des outils opérationnels pour guider la conception. Nous prévoyons que la cobotique soit une des clés pour replacer l'homme au cœur des moyens de production dans le cadre de l'Usine du futur. Réciproquement, l'intégration des opérateurs dans les projets de conception sera déterminante pour assurer la performance et l'acceptation des futurs systèmes cobotiques.

Industrial cobotic system design

Robotics approach and taking into consideration human factors

Practical application to manufacturing within Safran and ArianeGroup

Abstract

Human Robot Collaboration provides new perspectives to improve companies' performance and operators' working conditions, by bringing together workers expertise and adaptation capacity with robots' power and precision. In this research, we introduce the concept of "cobotic system", in which humans and robots – with possibly different roles – interact, sharing a common purpose of solving a task.

This robotic engineering PhD thesis has been completed as a team with the cognitive engineer Théo Moulières-Seban. Both PhD thesis were conducted under the leadership of Safran and ArianeGroup, which have recognized Human Robot Collaboration has strategic for their industrial performance. Together, we proposed the "cobotic system engineering" : a cross-disciplinary approach for cobotic system design. This approach was applied to several industrial needs within ArianeGroup.

In this thesis, we detail the design of a cobotic system to improve operators' health and safety on the "tank cleaning" workstation. We have proposed a teleoperation cobotic system to keep operators' expertise while placing them in a safe place to conduct operations. This solution is now under an industrialization phase for the production of Ariane launch vehicles.

We argue that thanks to their flexibility, their connectivity to modern workshops' technological ecosystem and their ability to take humans into account, cobotic systems will be one of the key parts composing the Industry 4.0.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Théo Moulières-Seban, mon emblématique binôme de thèse. Tu as forgé cette thèse avec tes critiques constructives, ta curiosité et ton esprit à la fois affûté et ouvert. Je sors grandi de nos partages et de notre amitié.

Merci à Jean-François Thibault, Bernard Claverie, Olivier Ly, Christine Marraud et Philippe Greco, sans qui cette thèse n'aurait pas existé. Merci à Bernard et Olivier pour votre direction et pour la complémentarité de vos points de vue qui est à l'origine de l'interdisciplinarité de ces travaux. Merci Christine pour ton accueil au sein du service Procédés et pour tes contributions soigneuses à cette thèse. Je tiens à exprimer toute ma gratitude envers Jean-François. Ta bienveillance et tes conseils ont été décisifs pour la réussite de cette thèse. C'est un très grand plaisir de travailler avec toi. Je remercie également tout particulièrement Simon Kamatchy. Merci pour ton support, pour tes critiques constructives, pour ta participation active au développement de cette thèse et pour ta capacité exemplaire à prendre du recul.

Je tiens à remercier toutes les personnes du service Procédés qui m'ont accueilli chaleureusement et que j'ai eu le plaisir de côtoyer au cours de ces quatre dernières années. Merci à Vincent, Rémy, Aurélie, Samuel, Sabine, Anaïs, Lucie, Clément, Laurianne, Guillaume, Perrine et Virginie.

Merci à Serge, Nicolas, Pascal et à l'ensemble des roboticiens de Safran pour les échanges enrichissants sur la robotique industrielle, ainsi que pour les regroupements chaleureux autour des différents sites de Safran. Je remercie aussi Mohamed, Sylvain, Thierry, Eric, Lionel, Maxime, Patrick, Christophe, Raphaël, Marie-Line, Valérie, Frédéric, et tous mes autres collègues d'ArianeGroup et de Safran avec qui j'ai eu le plaisir d'échanger.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers Julie et Julien du CEA pour votre aide lors du développement du prototype de nettoyage des cuves.

Merci aux doctorants de l'ENSC et en particulier à Damien, Quentin et Baptiste qui m'ont montré que doctorat pouvait rimer avec fun.

Merci à Jean, Maÿlis, Fabien, Emilie, Valentin, Anaïs, Hélène, Didier, Anne, Elisa, Mélanie, Nicolas G., Sébastien, Juliette, Bastien, Alex, Ophélie, Nicolas V., Donetsi, Adèle, Maxime, Suzanne, Thomas, Claire B., Nicolas D., Claire L., Franck, Coline, Cyrille et tous les autres pour leur amitié et pour les bons moments passés qui font relativiser les difficultés de la thèse. Jean, je tiens à t'adresser mes remerciements les plus profonds pour notre amitié si précieuse, je sais que je pourrai toujours compter sur toi.

Mes pensées vont ensuite à ma famille. Merci à ma mamie d'être une mamie si géniale. Merci à mon frère et ma sœur, Pascal et Angélique, pour les délires de famille que seuls nous pouvons comprendre. Je remercie chaleureusement mes parents qui m'ont toujours soutenu dans mes réalisations. Merci pour votre générosité et pour votre fierté touchante lors de mes réussites. Je suis fier d'être votre fils.

Merci à Muriel, Eric, Elodie et Sébastien pour vos encouragements dans la réussite de cette thèse, pour votre convivialité, et pour les discussions animées autour de la robotique et de la cobotique.

Mayalène, merci pour ton soutien permanent et pour ta présence réconfortante tout au long de cette thèse. Tu m'as tant appris, bien plus que tu ne peux l'imaginer. Je suis heureux de partager ta route.

Table des matières

Résumé / Abstract	3
Remerciements	5
Table des matières	7
1 Introduction	9
1.1 Genèse de la cobotique	9
1.2 Contexte de la thèse	11
1.3 Problématique et objectifs de la thèse	13
1.4 Organisation du document et contributions	14
2 De la robotique industrielle à la cobotique	17
2.1 La robotique et l'homme dans l'industrie	17
2.1.1 Robotique industrielle	17
2.1.2 Spécificités des cobots et des robots collaboratifs industriels	23
2.1.3 Proposition d'un modèle des systèmes robots appliqué à l'industrie	27
2.1.4 L'homme et l'automatisation	30
2.2 La cobotique	32
2.2.1 Définition de la cobotique	33
2.2.2 Les interactions homme-robot	33
2.2.3 Vers l'étude de la collaboration homme-robot	38
2.2.4 Modélisation des systèmes cobotiques	40
2.3 Conception d'un système cobotique pour l'industrie	45
2.3.1 Approche classique de conception d'une installation robotisée	45
2.3.2 Limites des approches de conception centrées sur le système robot	50
2.3.3 Intégration des opérateurs dans la conception	51
2.3.4 Proposition d'approche pour la conception d'un système cobotique	55
3 Analyse du besoin industriel de nettoyage des cuves de propergol	59
3.1 Description du besoin industriel	59
3.2 Construction du projet et du groupe de travail	61
3.3 Analyse préliminaire du poste de nettoyage des cuves	61
3.3.1 Analyse des études internes précédentes	61
3.3.2 Étude du poste et du travail prescrit	63
3.3.3 Analyse des postes amont et aval	66
3.3.4 Analyse de l'activité de travail des opérateurs	67
3.4 État de l'art des moyens de nettoyage	73
3.4.1 Technologies et automation du nettoyage	73
3.4.2 Nettoyage de produits chimiques et pyrotechniques	74
3.4.3 Nettoyage de cuves et outillages	74
3.4.4 Synthèse	75

4	Conception d'un système cobotique de nettoyage des cuves de propergol	77
4.1	Élaboration et simulations d'un principe de solution	77
4.1.1	Définition des hypothèses de conception sur le système cobotique	77
4.1.2	Simulation du système robot	81
4.1.3	Simulation participative de l'activité future du système cobotique	85
4.1.4	Synthèse des résultats pour la conception	89
4.2	Élaboration d'une maquette interactive et première simulation des interactions homme-robot	91
4.2.1	Définition des hypothèses de conception sur les interactions	91
4.2.2	Développement d'une maquette numérique interactive	100
4.2.3	Réalisation des tests utilisateurs	104
4.2.4	Synthèse des résultats pour la conception	107
4.3	Réalisation d'un prototype	108
4.3.1	Matériel et architecture logicielle	110
4.3.2	Évaluation du procédé de nettoyage automatisé	113
4.3.3	Développement du prototype pour les tests utilisateurs	114
4.3.4	Tests utilisateurs avec le prototype et résultats	129
4.4	Industrialisation du système cobotique de nettoyage des cuves pour Ariane 5 et 6	133
4.4.1	Description des besoins du nettoyage des cuves en Guyane	134
4.4.2	Adaptation du système cobotique pour le nettoyage des cuves de Guyane	136
4.4.3	Simulation en réalité virtuelle de la solution	141
4.4.4	Chiffrage de la solution développée et perspectives du projet	143
5	Déploiement de la cobotique et de notre approche de conception	145
5.1	Applications de l'approche sur d'autres postes de travail	145
5.1.1	Finition des chargements de propergol	145
5.1.2	Manutention des armatures	151
5.2	Développement d'un portail collaboratif "cobotique" et partage d'outils pour la conception	152
5.2.1	Aide au choix d'un type de système de travail	153
5.2.2	Outil d'exploration des robots collaboratifs	154
5.3	Discussions sur notre approche et sur le développement de la cobotique	156
5.3.1	Interdisciplinarité de l'approche et concepts développés	157
5.3.2	Application de la démarche dans des projets industriels	159
5.3.3	Diffusion de la méthodologie et de la cobotique	161
5.3.4	Types de systèmes cobotiques étudiés et perspectives de la cobotique	162
6	Conclusion	165
	Productions scientifiques et techniques	169
	Publications et communications avec actes	169
	Communications et conférences	169
	Participations	170
	Événements	170
	Visites de sites industriels et technologiques	170
	Encadrement d'étudiants	171
	Notes techniques et communications internes ArianeGroup et Safran	171
	Notes techniques	171
	Communications au sein d'ArianeGroup	172
	Communications au sein de Safran	173
	Glossaire	175
	Acronymes et sigles	177
	Bibliographie	179

Chapitre 1

Introduction

1.1 Genèse de la cobotique

Depuis plusieurs années, la collaboration homme-robot est devenue un sujet d'étude prenant une place de plus en plus importante dans la société. Originellement, les interactions homme-robot (IHR) ont été développées pour les domaines de la recherche et du sauvetage, du service aux personnes, du militaire et de l'exploration spatiale [GS07]. Les robots sont alors utilisés pour assister les personnes, pour augmenter leurs capacités d'action, et pour intervenir dans des milieux hostiles ou inaccessibles à l'homme.

Dans l'industrie, les IHR sont d'abord apparues pour permettre la production nucléaire, avec la réalisation des opérations de maintenance des réacteurs en téléopération pour protéger les opérateurs du milieu radioactif. Plus récemment, le déploiement de la collaboration homme-robot s'est étendu dans le reste de l'industrie grâce à l'émergence de technologies qui permettent aux hommes d'interagir physiquement avec des robots industriels en sécurité, et suite à l'évolution des normes qui autorisent la mise en œuvre des interactions homme-robot sur les postes de travail, dans un espace partagé.

La cobotique dérive du concept de cobot. Ce terme a été introduit en 1996 par Colgate, Wanasuphprasit et Peshking [CWP96], au sein du département d'ingénierie mécanique de l'université Northwestern (États-Unis). Le cobot, néologisme issu des mots robot et collaboration, désigne alors un dispositif passif¹ dont l'actionnement permet de contraindre et guider les mouvements d'une personne, en définissant des surfaces virtuelles programmables. Le premier prototype de cobot industriel a été élaboré en 1998 en collaboration avec General Motors [WAPC98] pour aider les opérateurs au déchargement des portières de véhicules (cf. figure 1.1).



Figure 1.1 – Premier prototype de cobot industriel introduit chez General Motors pour assister les opérateurs au déchargement de portières de voitures [WAPC98].

1. C'est-à-dire, ici, dont l'énergie des déplacements est fournie par l'homme.

Les essais réalisés sur ce poste de travail ont montré que cette nouvelle forme d'assistance apportait des gains en matière de santé, de sécurité, de productivité et de qualité [APC⁺99]. Les surfaces virtuelles permettent de guider passivement les mouvements des opérateurs pour plus d'efficacité et de sécurité. L'opérateur n'ayant plus besoin d'appliquer d'effort important pour changer de direction, l'inerte ressentie est réduite, de même que la fatigue et le risque de blessure.

Cependant, pendant plusieurs années, ces dispositifs pouvant interagir avec l'homme ont évolué principalement en laboratoire. À partir de 2008, une nouvelle étape a été franchie pour le déploiement des interactions homme-robot dans l'industrie avec la commercialisation du premier "robot collaboratif"², l'UR5, par la société danoise Universal Robots. Ce robot est conçu de manière à pouvoir interagir physiquement avec des personnes en toute sécurité. La mesure des courants des moteurs présents dans les articulations permet de déterminer et de limiter les efforts appliqués par le robot.

Au cours des années qui ont suivi, les grands constructeurs de robots industriels ont développé leur modèle de "robot collaboratif", à commencer par la société allemande Kuka qui a commercialisé le LBR iiwa en 2011. La même année, la société française RB3D a commercialisé son premier robot manipulateur d'assistance, se rapprochant de la philosophie initiale du cobot des chercheurs de l'université Northwestern. Ce robot manipulateur, qualifié de "cobot" par RB3D [Lam16], est capable par programmation de compenser le poids ou l'inertie des charges manipulées, de guider les gestes des opérateurs à l'aide de surfaces virtuelles et de démultiplier les efforts de l'homme.

Face à l'émergence de ces nouveaux types de dispositifs, un grand nombre d'entreprises, d'instituts ou centres de recherche, et d'organismes publics se sont réunis pour normaliser leur conception et leur intégration sur les postes de travail industriels, du point de vue de la sécurité. Cela a conduit à la publication en 2011 d'une mise à jour de la norme internationale ISO 10218 "Exigences de sécurité pour les robots industriels"³, pour cadrer les nouveaux modes de fonctionnement relatifs à la collaboration homme-robot dans un espace partagé.

Cependant, la cobotique ne se limite pas à l'étude et à l'utilisation des cobots et des "robots collaboratifs", qui sont des dispositifs techniques. Elle porte au sens large sur la collaboration homme-robot, que ce soit avec des robots manipulateurs, des robots mobiles [Dev12] ou des exosquelettes [CLF13]. Cette collaboration peut s'appuyer sur des interactions directes aussi bien qu'à distance. La cobotique vise à dépasser les facultés de l'homme et du robot isolés, en les couplant au sein d'un système pour faire émerger de nouvelles aptitudes et réaliser des tâches de manières plus efficace. L'homme est ainsi augmenté par les capacités du robot et réciproquement. Le champ de la cobotique industrielle englobe les systèmes de téléopération, de colocalisation collaborative, de comanipulation et d'exomanipulation⁴.

Dans l'industrie, la cobotique est une opportunité pour améliorer la performance des entreprises, ainsi que la santé et la sécurité des personnes sur les postes de travail. Elle offre une nouvelle voie pour transformer les tâches inefficaces, pénibles ou dangereuses, lorsque l'automatisation classique ne peut pas remplacer l'expertise des opérateurs ou qu'elle n'est pas suffisamment rentable. Le robot peut par exemple assister l'homme pour réduire les efforts physiques inhérents à la réalisation d'une tâche, ou le placer en sécurité vis-à-vis d'un environnement hostile.

De plus, vis-à-vis d'une cellule automatisée, le système robot peut être simplifié par l'utilisation des savoir-faire, des capacités de perception, d'adaptation et de prise de décision de l'homme. La cobotique se positionne donc entre le travail manuel et l'automatisation, comme illustré sur la figure 1.2. Cette figure – adaptée de Makarov [Mak13], d'après Hägele et al. [HSH02a] – met en valeur l'apport économique potentiel de la cobotique par rapport au travail manuel, à la robotisation et à l'utilisation de machines spéciales. Le travail manuel peut être préférable pour des faibles volumes de production, alors que l'automatisation classique est généralement plus rentable pour des productions en très grande

2. Ici, et dans la suite de ce document, nous plaçons ce terme entre guillemets car il qualifie un type de robot spécifique qui intègre de manière intrinsèque des dispositifs de sécurité permettant son interaction directe avec l'homme.

3. Les parties 1 [AFN11a] et 2 [AFN11b] de cette norme sont à destination respectivement des concepteurs et des intégrateurs des robots industriels.

4. Ces types de système sont décrits dans la section 2.2.4.

série, avec peu de variations et des durées de cycle faibles. Pour les volumes et cadences de production intermédiaires, la cobotique peut apporter une augmentation de la rentabilité et un gain en flexibilité.

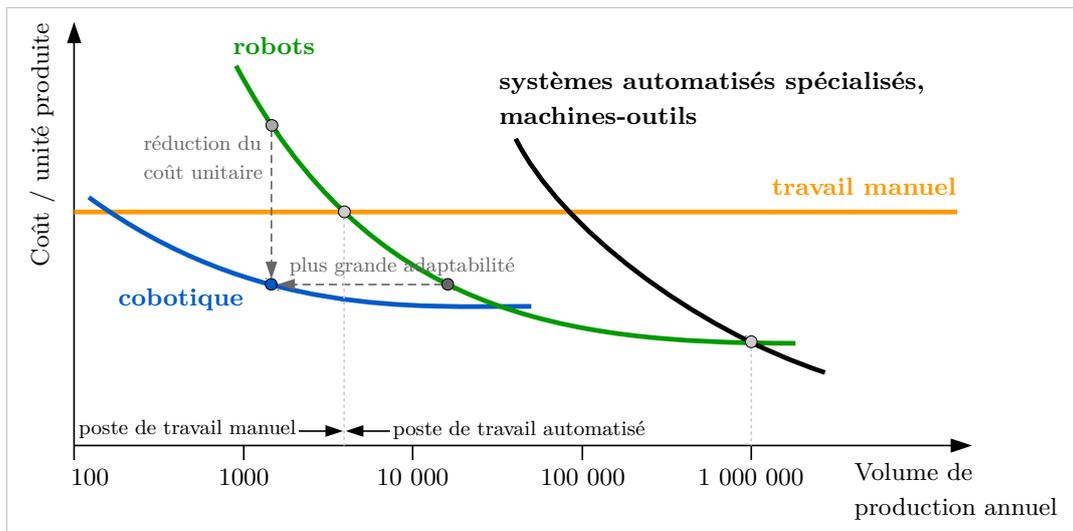


Figure 1.2 – Coût de production en fonction du volume de production pour la cobotique, comparé au travail manuel et à l'automatisation. Adapté de Makarov [Mak13] – d'après Hägele et al. [HSH02a].

En 2013, le gouvernement français a annoncé un plan de 100 millions d'euros d'investissement dans la filière robotique pour placer la France parmi les leaders mondiaux d'ici 2020. Un volet de ce plan "France Robot Initiative" [MM13] est consacré à la cobotique, la positionnant comme stratégique pour la compétitivité de la France et de ses entreprises.

Cette position stratégique a été confirmée en 2016, dans les résultats de l'étude "Technologies clés 2020 – Préparer l'industrie du futur" [Dir16]. Cette étude prospective des technologies est conduite tous les 5 ans par le ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique et est pilotée par la Direction générale des entreprises (DGE). Elle a pour objectif d'identifier, parmi l'ensemble des technologies disponibles et émergentes, celles qui sont stratégiques à moyen terme pour la compétitivité des entreprises françaises. Pour cette 5^e édition de l'étude, seules 47 technologies ont été retenues et des recommandations opérationnelles sont proposées pour permettre aux entreprises françaises de conquérir les marchés mondiaux correspondant. La cobotique y figure en 10^e place, avec un grand nombre de domaines d'application potentiels⁵. Cette étude prévoit que le secteur de l'industrie soit le premier bénéficiaire à moyen terme de la cobotique. Celle-ci est pressentie comme un facteur de compétitivité pour l'industrie manufacturière en particulier.

1.2 Contexte de la thèse

Cette thèse a été réalisée avec Safran⁶, leader dans l'aéronautique, la défense et la sécurité, et ArianeGroup⁷, leader mondial de l'accès à l'espace. Ces entreprises produisent des systèmes et équipements de très grande valeur dans les domaines aéronautique et spatial, avec de faibles volumes de production. Un grand nombre des postes de travail en production relèvent de l'artisanat, avec du personnel hautement qualifié. Ainsi, les lignes de production de ces groupes restent aujourd'hui faiblement

5. Parmi lesquels on peut citer l'industrie, la santé, la mobilité ou encore l'alimentation.

6. Safran est un grand groupe industriel français, fournisseur de systèmes et d'équipements au niveau international dans les domaines de l'aéronautique, de la défense et de la sécurité. Safran regroupe plusieurs sociétés réparties sur plus de 100 sites industriels dans le monde, avec plus de 60 000 salariés.

7. ArianeGroup est une coentreprise créée en 2014 par Safran et Airbus pour faire face à la montée de la concurrence internationale dans le domaine des lanceurs spatiaux, en développant les lanceurs Ariane 6.

automatisées⁸, et la cobotique y possède un potentiel d'autant plus élevé, comme le souligne l'étude "Technologies clés 2020 – Préparer l'industrie du futur" [Dir16].

Pour Safran et ArianeGroup, la cobotique est une innovation qui doit permettre de :

- améliorer la productivité et la qualité en s'affranchissant des limites liées aux capacités humaines (force, précision, endurance, traitement d'une grande quantité de données, calcul) ;
- réduire la pénibilité aux postes (physique, physiologique, cognitive, liée à l'environnement) ;
- assurer une flexibilité des moyens de production afin de gérer les variabilités industrielles ;
- maintenir dans l'emploi des experts et permettre l'accès aux postes à un éventail plus large d'opérateurs (handicap, féminisation, âge, force physique, taille, etc.) ;
- réduire les coûts d'investissement (c'est-à-dire de programmation, de mise au point, en réduisant le besoin d'espace au sol et de barrières de protection) par rapport à une automatisation complète.

En 2012, Safran a lancé un premier projet "cobotique" sur l'un de ses sites avec un prestataire ayant en charge l'étude et la réalisation d'un moyen avancé d'aide à la manutention. Lors de la mise en service, les équipes de production ont découvert un dispositif qui répondait partiellement aux attentes, n'améliorait pas la performance, et n'était pas compatible avec toutes les pièces. De plus, des problèmes d'utilisation du dispositif ont engendré un accident du travail.

En 2013, fort de ce retour d'expérience et face aux enjeux industriels de la cobotique, Safran a souhaité s'emparer du sujet pour mieux prendre en compte l'homme dans la conception de tels dispositifs. Pour cela, Safran a décidé de lancer un projet groupe sur la cobotique, piloté conjointement par la Direction du développement durable (en la personne du responsable de l'ergonomie du groupe) et la Direction industrielle, constitué par un groupe de travail multi-sites et multi-sociétés. L'objectif du projet est alors de développer la cobotique dans les usines en intégrant conjointement les aspects robotiques, industriels et humains. Un appel à projet a été lancé auprès des différentes sociétés du groupe pour travailler sur la cobotique au travers d'applications concrètes. Safran Herakles⁹ y a répondu en proposant le sujet "nettoyage des cuves de propergol".

Souhaitant aborder le déploiement de la cobotique sur les postes de travail industriels avec une approche méthodologique interdisciplinaire, deux thèses ont été créées par Safran en 2014 :

- en cognitique¹⁰ [MS17] ;
- et en robotique, que nous présentons ici.

Le binôme d'ingénieurs doctorants ainsi constitué a été rattaché à l'équipe Cognitique et ingénierie humaine (CIH) du laboratoire de l'Intégration du matériau au système (IMS). Cette thèse a été conduite sous la double direction de thèse de Bernard Claverie – directeur de l'École nationale supérieure de cognitique (ENSC) – et d'Olivier Ly – enseignant-chercheur en robotique au Laboratoire bordelais de recherche en informatique (LaBRI). Nous avons été recrutés en thèse Cifre¹¹ par Safran¹² pour développer cette approche méthodologique, sous la coordination du responsable de l'ergonomie de ce groupe, avec comme première application le nettoyage des cuves de propergol.

Afin de s'appuyer sur des compétences en robotique dans l'industrie, le groupe Safran s'est, entre autres, rapproché d'un rassemblement de fournisseurs régionaux spécialistes : le cluster Aquitaine Robotics. Les échanges avec les membres de ce cluster, notamment avec le CEA Tech¹³, CompositAdour et Lucas France, ont contribué aux résultats de cette thèse. L'organisation du projet cobotique est reprise par la figure 1.3.

8. Par rapport à l'industrie automobile notamment.

9. Safran Herakles a intégré ArianeGroup en 2014.

10. La cognitique est une science interdisciplinaire qui s'intéresse au traitement de la connaissance, qu'elle soit humaine ou informatisée, et à leurs interactions [Cla05].

11. Conventions industrielles de formation par la recherche (Cifre).

12. Respectivement rattaché au service Procédés d'Herakles (Théo Moulières-Seban) et à la Direction du développement durable du groupe (David Bitonneau).

13. Le CEA Tech est le pôle de recherche technologique du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

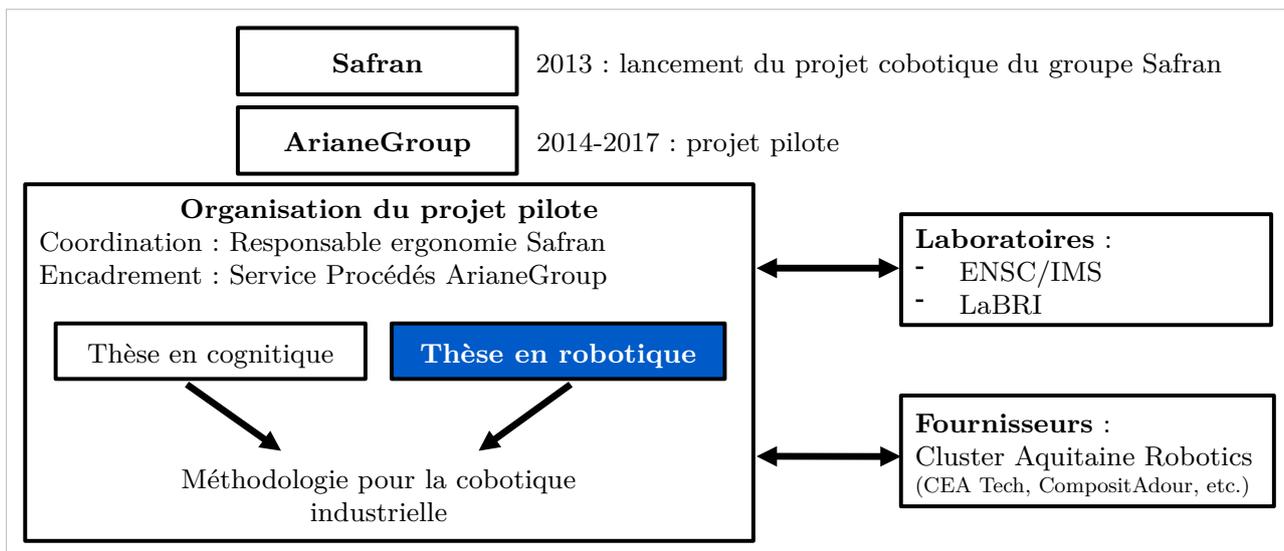


Figure 1.3 – Structure du projet cobotique au sein de Safran et ArianeGroup.

1.3 Problématique et objectifs de la thèse

Depuis des décennies, les réponses apportées pour améliorer la productivité dans l'industrie manufacturière sont fournies par l'automatisation des procédés de fabrication. Celle-ci vise à remplacer l'homme par des ordinateurs, des automates, des robots et/ou des machines, afin de réduire les coûts de production, augmenter les cadences, et éliminer les variabilités et les risques d'erreur humaine. Pour cela les actions habituellement réalisées par les opérateurs humains sont découpées en une succession de tâches unitaires pouvant être reproduites par les machines.

Cette démarche centrée sur la technologie s'est propagée dans l'industrie, remplaçant d'abord le travail de l'homme par celui des machines sur des tâches simples et répétitives. Avec la sophistication des capteurs, des actionneurs, des architectures mécaniques et des systèmes de contrôle, la robotisation a ciblé des tâches de plus en plus complexes¹⁴.

Les concepteurs ont ainsi fait face aux tâches complexes en augmentant la complexité technologique. Or cette augmentation a plusieurs effets indésirables pour les industriels :

- hausse du coût d'investissement, de reprogrammation et de maintenance ;
- difficulté de maîtriser le procédé de fabrication, avec une conception souvent sous-traitée ;
- difficulté d'assurer le fonctionnement des moyens dans l'ensemble des situations possibles ;
- difficulté pour les opérateurs d'intervenir sur la ligne de production en situation transitoire et dégradée.

Par ailleurs, la démarche systématique de robotisation souvent employée dans l'industrie sous-entend que le travail des opérateurs va être totalement remplacé par celui des robots. Cependant, après la robotisation d'un procédé, l'opérateur reste bien souvent nécessaire pour la programmation de la machine, pour sa supervision, pour sa maintenance, pour intervenir face à une situation non prise en charge par le robot, pour réaliser les tâches difficiles à automatiser ou pour remplacer le robot en cas de panne [Hel90]. Le fonctionnement d'un robot se limite à des situations bien définies, prévues en amont par les concepteurs. De nombreuses situations de travail requièrent en réalité de s'adapter à des variabilités, souvent imprévues. La performance de l'automatisation est donc limitée par la nécessité d'intervention humaine¹⁵ pour gérer les cas non prévus par les concepteurs [End15].

14. C'est-à-dire des tâches qui présentent de nombreuses variabilités, qui évoluent dans un environnement dynamique, pour lesquelles les actions réalisées peuvent avoir des conséquences imprévisibles ou qui nécessitent une forte expertise des opérateurs [MS17].

15. Qui est synonyme d'arrêt et de ralentissement de la production, ce qui implique des pertes financières.

Ainsi, même les systèmes les plus automatisés sont finalement des systèmes homme-machine, pour lesquels la prise en compte des opérateurs est généralement négligée. Les démarches d'automatisation adoptées ont souvent sous-estimé le rôle de l'homme – qui régule les variabilités et les situations inattendues – et la transformation de son activité de travail. Ce manque d'anticipation des futures situations de travail a conduit à de nombreux échecs de l'automatisation au cours des dernières décennies [LS09].

Face à cela, la collaboration homme-robot offre de nouvelles perspectives pour rendre les moyens de production plus robustes aux variabilités et mieux adaptables aux changements, en s'appuyant sur les capacités cognitives des opérateurs. En effet, même les progrès importants en intelligence artificielle ne suffisent pas pour égaler la plasticité et le pouvoir d'adaptation de la cognition humaine [MS17].

La collaboration homme-robot ouvre également l'opportunité pour l'industrie de simplifier le développement¹⁶ des systèmes robots en s'appuyant au mieux sur les capacités des opérateurs. La cobotique est ainsi un moyen de dépasser les limites du travail manuel et de l'automatisation classique pour améliorer les postes peu performants ou pénibles qui perdurent dans les usines, à cause de la complexité des tâches à réaliser et/ou du coût d'une solution complètement automatisée.

Puisque les opérateurs sont les experts du travail actuel et les futurs utilisateurs du système homme-robot, il est d'autant plus important de prévoir leur rôle dans la collaboration et de les intégrer dans la conception pour éviter de développer un système :

- qui présente de nouveaux risques pour la santé et pour la sécurité des opérateurs ;
- qui n'est pas adapté aux besoins réels des opérateurs et aux situations de travail, et donc qui ne sera pas accepté ;
- qui est moins efficace que les anciennes méthodes de travail des opérateurs, et donc qui risque de ne pas être utilisé ;
- qui est souvent en panne ou qui génère des problèmes de qualité, et donc qui dégradera la productivité ou la rentabilité de l'entreprise.

Pour répondre à ces problématiques, les objectifs de la thèse sont triples :

- définir et modéliser les systèmes cobotiques¹⁷ ;
- proposer une démarche méthodologique interdisciplinaire pour améliorer le développement de la cobotique dans l'industrie, en intégrant les opérateurs dans la démarche de conception pour concevoir des systèmes adaptés à l'homme ;
- confronter cette approche à différents postes de travail au sein de Safran et d'ArianeGroup, en commençant par concevoir un système cobotique pour améliorer le nettoyage des cuves de propergol.

Nous développons dans cette thèse une démarche de conception pour la cobotique et son application dans l'industrie selon une perspective robotique, tout en accordant une place prépondérante à l'intégration de l'homme dans le processus de conception.

Cette thèse est complémentaire de celle de Théo Moulières-Seban [MS17] qui aborde plus spécifiquement la démarche suivant le prisme de l'ingénierie cognitive et qui détaille l'aspect humain du système cobotique industriel.

1.4 Organisation du document et contributions

Le chapitre 2 positionne la cobotique par rapport à la robotique industrielle. Nous introduisons le concept de système cobotique, défini comme un système au sein duquel un homme et un robot collaborent pour réaliser une tâche dans un environnement donné. Nous proposons ainsi une modélisation

16. Et donc de réduire les coûts.

17. Nous introduisons ce concept dans la section 2.2.4.

et une typologie des systèmes cobotiques, intégrant les rôles de l'homme et du robot dans la collaboration. Les modèles des systèmes robots industriels et de l'homme au travail sont également introduits ; ils complètent celui des systèmes cobotiques. Face au constat de la faible prise en compte de l'homme dans les démarches actuelles de robotisation, nous posons les bases d'une approche interdisciplinaire qui intègre les opérateurs dans la conception des systèmes cobotiques.

Le chapitre 3 présente le besoin industriel d'améliorer les conditions de travail des opérateurs sur le poste de nettoyage des cuves de propergol chez ArianeGroup, ainsi que notre analyse préliminaire du poste en production. Sur le poste actuel, les opérations de nettoyage sont réalisées manuellement par les opérateurs. Ce sont des opérations pyrotechniques, qui engendrent donc un risque pour leur sécurité, et qui sont difficiles car elles nécessitent des efforts physiques importants. L'analyse de l'activité des opérateurs et l'état de l'art des moyens de nettoyage, que nous décrivons dans ce chapitre, montrent la difficulté d'automatiser ces opérations et la pertinence d'envisager une solution cobotique.

Le chapitre 4 aborde le développement d'un système cobotique pour répondre au besoin industriel de nettoyage des cuves de propergol. Nous avons fait évoluer cette conception à travers plusieurs itérations de simulations participatives impliquant les opérateurs du poste de travail, et en nous appuyant sur les modèles des systèmes cobotiques et des systèmes robots que nous avons définis dans le chapitre 2. Nous commençons par présenter l'élaboration d'un principe de solution à partir des résultats de notre analyse préliminaire du poste de travail (section 4.1). Un système cobotique de type téléopération est alors proposé pour placer les opérateurs en sécurité lors des opérations pyrotechniques. Nous avons ensuite étudié plus spécifiquement les interactions homme-robot à l'aide d'une maquette numérique interactive du système (section 4.2). Nous avons développé un prototype pour tester le procédé de nettoyage avec le système robot sur du produit inerte et pour évaluer les interactions des opérateurs avec le système dans des conditions plus proches des situations réelles de travail (section 4.3). Enfin, nous présentons un ensemble de travaux menés pour l'industrialisation du système cobotique de nettoyage des cuves pour ArianeGroup (section 4.4).

Le chapitre 5 offre une ouverture sur le déploiement de la cobotique à d'autres postes de travail, puis dresse un bilan sur notre démarche d'ingénierie. Nous commençons donc par aborder l'application de notre approche méthodologique sur deux autres postes de travail : la finition des chargements de propergol et la manutention des armatures. Nous évoquons ensuite le développement d'un portail web "cobotique" visible par l'ensemble des personnes du groupe Safran pour diffuser la cobotique et nos outils pour la conception. Nous faisons un retour d'expérience sur notre démarche interdisciplinaire de conception des systèmes cobotique et sur son déploiement au sein de Safran et d'ArianeGroup. Nous terminons en présentant des perspectives liées aux futures évolutions potentielles de la cobotique dans le cadre du développement de l'industrie du futur.

Les contributions présentées dans cette thèse sont ainsi :

- Une définition, une modélisation et une typologie des systèmes cobotiques (cf. section 2.2.4).
- Une approche interdisciplinaire pour l'ingénierie des systèmes cobotiques dans l'industrie. Les opérateurs sont intégrés dans la conception à travers l'analyse de leur activité de travail et les simulations participatives (cf. section 2.3.4). Différents outils sont proposés pour faciliter l'application de la démarche : notamment, le modèle des systèmes robots (cf. section 2.1.3), le modèle de l'homme au travail (cf. section 2.1.4.3) et l'élaboration des hypothèses de conception à partir de la formalisation de l'activité des opérateurs et de ses déterminants par sous-tâche (cf. figure 2.21, page 57).
- L'étude et le développement de systèmes cobotiques pour différents postes de travail au sein de Safran et ArianeGroup. Trois projets sont présentés dans ce document : le nettoyage des cuves de propergol (cf. chapitres 3 et 4), la finition des chargements de propergol (cf. section 5.1.1) et la manutention des armatures (cf. section 5.1.2).
- Le déploiement à plus grande échelle de la cobotique et de notre démarche méthodologique de conception chez Safran, puis chez ArianeGroup (cf. sections 5.2 et 5.3).

En 2017, fort des résultats de nos travaux, ArianeGroup a officiellement reconnu la cobotique comme stratégique pour sa compétitivité et s'est doté de nouveaux moyens dédiés à son développement, auxquels nous prenons part désormais.

Chapitre 2

De la robotique industrielle à la cobotique

Ce chapitre décrit globalement la robotique industrielle et met en valeur la place actuellement laissée aux hommes lors d'automatisations. La cobotique est positionnée comme le domaine de la collaboration homme-robot. Ce domaine offre de nouvelles perspectives dans l'industrie. En définissant la notion de "système cobotique" nous proposons un support pour la conception de cette collaboration. Nous exposons les limites des approches existantes pour la conception des systèmes cobotiques et proposons une approche interdisciplinaire impliquant les opérateurs dans la conception.

2.1 La robotique et l'homme dans l'industrie

Cette première partie introduit la robotique industrielle avant de souligner les perspectives offertes par les cobots et robots collaboratifs qui ont fait leur apparition depuis quelques années. Ces descriptions nous amènent à définir un modèle des systèmes robots pour formaliser leurs caractéristiques et la part qu'ils peuvent prendre dans la collaboration avec l'homme. Nous terminons en mettant en perspective la place de l'homme au travail et face à la robotisation.

2.1.1 Robotique industrielle

Dans la section 2.1.1.1, nous commençons par définir certains termes clés pour la robotique industrielle. Les applications de la robotique dans l'industrie sont décrites dans la section 2.1.1.2, avant d'explicitier l'architecture et le fonctionnement des robots dans les sections respectives 2.1.1.3 et 2.1.1.4.

2.1.1.1 Définitions

La norme ISO 8373:2012¹ fournit une spécification du vocabulaire lié aux robots et composants robotiques, en incluant des termes spécifiques à l'industrie. Cette norme de l'Organisation internationale de normalisation (International Organization for Standardization – ISO), donne un socle de définitions approuvé par un grand nombre d'acteurs mondiaux de la robotique. La Fédération internationale de robotique (International Federation of Robotics – IFR) – qui regroupe des acteurs industriels, académiques et d'autres associations de robotique à travers le monde – s'appuie notamment sur ces définitions². Nous nous baserons également sur cette norme pour les termes "robot",

1. Dont la déclinaison française, par l'Association française de normalisation (AFNOR), a pour référence NF EN ISO 8373:2012 [AFN12].

2. https://ifr.org/img/office/Industrial_Robots_2016_Chapter_1_2.pdf

"robot industriel", "système robot" et "cellule industrielle robotisée" qui sont utilisés dans la suite de cette thèse.

Un robot est un « mécanisme programmable actionné sur au moins deux axes avec un degré d'autonomie, se déplaçant dans son environnement, pour exécuter des tâches prévues. Il inclut le système de commande et l'interface de communication ».

L'autonomie³ est définie, dans la norme, par la « capacité d'exécuter des tâches prévues à partir de l'état courant et des détections, sans intervention humaine ».

Le système de commande est lui défini comme l' « ensemble des fonctions de commande logique et de puissance permettant de piloter et de commander la structure mécanique du robot et de communiquer avec l'environnement (matériels et utilisateurs) ».

Un robot est donc composé d'actionneurs, de capteurs et d'un système de commande lui permettant d'exécuter des tâches de manière autonome en déplaçant sa structure mécanique. Ses interfaces lui permettent de communiquer avec son environnement, dont les hommes font partie.

Un robot industriel est un « manipulateur multi-application reprogrammable commandé automatiquement, programmable sur trois axes ou plus, qui peut être fixé sur place ou mobile, destiné à être utilisé dans des applications d'automatisation industrielle ».

La norme précise que la définition inclut le manipulateur (y compris les actionneurs), le système de commande (dont le pendant d'apprentissage et les interfaces de communication) et les axes additionnels intégrés. Les autres familles de robot (mobile ou exosquelette par exemple) ne sont pas incluses dans la définition du robot industriel.

Un système robot (industriel) est un « système comprenant un ou plusieurs robots (industriels), un ou plusieurs terminaux, et tous les mécanismes, équipements, composants et capteurs nécessaires au robot dans l'exécution de sa tâche ».

Le système robot inclut donc les capteurs externes, effecteurs et autres interfaces qui ne font pas partie du robot. Par exemple, pour réaliser une tâche de soudage, un système robot peut être composé d'un robot industriel, d'une torche de soudage (effecteur), et d'une caméra (qu'elle soit placée au niveau de l'effecteur du robot industriel, ou fixée dans la cellule) pour contrôler la qualité du soudage en temps réel.

Pour étudier et concevoir la collaboration homme-robot, nous nous intéresserons dans la suite de cette thèse au système robot, qui comprend l'ensemble des éléments contribuant à la réalisation de la tâche et avec lesquels l'homme pourra être amené à interagir.

Une cellule industrielle robotisée contient « un ou plusieurs systèmes robots industriels comprenant des machines et des équipements associés, ainsi que l'espace contrôlé⁴ et les mesures de prévention associées ».

En plus du système robot, la cellule contient ainsi les protections périmétriques et les dispositifs permettant d'assurer la sécurité. Les machines et équipements associés permettent par exemple l'alimentation et l'évacuation des pièces, ou la réalisation d'un procédé spécifique non pris en charge par le robot industriel.

3. Nous discutons de l'autonomie des robots dans la suite de cette thèse (section 2.2.2.2).

4. Espace défini par les protections périmétriques [AFN12].

2.1.1.2 Applications robotiques dans l'industrie

Tout d'abord, notons que cette thèse s'intéresse à l'industrie manufacturière et pas aux autres industries telles que la construction, le service, le transport ou encore la collecte et l'exploitation de ressources naturelles.

Les procédés principaux que l'on retrouve dans l'industrie manufacturière sont :

- La transformation de pièce : moulage, usinage, perçage, rectification, enlèvement de matière, etc.
- La préparation de surface : peinture, enduction, projection thermique/plasma, grenailage, etc.
- L'assemblage : rivetage, vissage, soudage, insertion, collage, etc.
- Les manutentions : manipulation de pièce, chargement/déchargement de machine, positionnement, etc.
- La distribution⁵.
- La palettisation et le conditionnement.
- L'inspection et le test.
- Le nettoyage.

Les différents types de procédé industriel présentés ici ont été sujets à la robotisation depuis de nombreuses années, que ce soit pour des questions de productivité, de qualité, de réduction des coûts ou d'amélioration de la santé des personnes.

Depuis les années 1990, la répartition des procédés majoritairement robotisés a évolué. En 1996, les principales applications sur lesquelles des robots étaient déployés dans le monde étaient l'assemblage (33%⁶) et le soudage (22%)⁷ [IFR97]. L'année suivante, en 1997, les principales nouvelles ventes de robots dans le monde ciblaient le soudage (48%) et la manutention (32%)⁸. Plus récemment en 2014, sur les 221 000 robots vendus dans le monde cette année là, les tâches visées étaient devenues principalement la manutention (52%), le soudage et le brasage (26%)⁹.

La première industrie historiquement concernée par la robotisation est l'industrie automobile. En 2015, parmi les 1,6 million de robots industriels en fonctionnement dans le monde, environ 38% étaient utilisés par l'industrie automobile, 20% par l'industrie électronique, 10% dans la métallurgie, 9% dans l'industrie chimique et plastique et 3% dans l'alimentaire [IFR16].

Un grand nombre d'opérations reste difficile à robotiser du fait du coût ou de la complexité, et le travail des opérateurs reste la réponse principale à leur réalisation. L'arrivée des "robots collaboratifs" offre de nouvelles possibilités pour "semi-automatiser" les tâches tout en valorisant l'expertise humaine (cf. section 2.1.2). L'IFR prédit par ailleurs un déploiement majeur des "robots collaboratifs" dans l'industrie manufacturière dans les années à venir [IFR16].

2.1.1.3 Architecture des robots

Les grandes familles de robot que l'on retrouve dans l'industrie sont les manipulateurs (qui sont les plus répandus), les robots mobiles à roue – principalement représentés par les véhicules à guidage automatique (Automated Guided Vehicle – AGV) – qui sont parfois combinés aux manipulateurs [HNP08] et les exosquelettes depuis peu [SBCF14]. Les robots manipulateurs ayant été principalement étudiés sur nos cas d'application, les robots mobiles et exosquelettes seront plus brièvement traités dans cette thèse.

5. "Dispensing" en anglais. Correspond par exemple au versement de liquide, au tri de petits objets ou au remplissage de récipients.

6. Ces pourcentages correspondent au nombre de robot en fonctionnement sur l'application, sur le nombre total de robot en fonctionnement.

7. Suivi par le moulage de plastique (10%), l'usinage (10%), la manutention (6%), la peinture, l'enduction et la distribution (3%), la fonderie (3%), la palettisation/conditionnement (3%) et l'inspection et test (2%).

8. Suivi par l'assemblage (6%), l'enduction (4%), l'enlèvement de matière (3%), l'inspection (3%) et la distribution (2%) [IFR97].

9. Suivi par l'assemblage (8%), la distribution (4%), et la transformation (2%) [IFR15].

Les robots sont composés d'une structure mécanique, d'actionneurs, de capteurs, d'interfaces et d'un système de commande (voir section 2.1.1.1). Ils peuvent ainsi être programmés pour réaliser des tâches. Chacun de ces différents composants est décrit ci-après.

Structure mécanique et actionneurs : Les actionneurs, combinés aux systèmes de transmission, permettent de transformer de l'énergie (généralement électrique, pneumatique ou hydraulique) en mouvement, que ce soit pour déplacer un robot mobile, positionner à un manipulateur ou pour fermer une pince [SM08]. Dans le cas des manipulateurs, ces actionneurs permettent de déplacer les articulations (ou axes) arrangées en chaînes cinématiques (série, parallèle ou hybride). Ces articulations sont généralement de type prismatique ou rotoïde et leur arrangement définit le type de structure mécanique.

Schraft et ses collaborateurs classifient les types de robot suivant leur structure mécanique [SNS01] :

- Cartésien : composé uniquement d'articulations prismatiques, ou axes linéaires. Ils prennent généralement la forme de portique, leur valant le qualificatif de "gantry" en anglais.
- Cylindrique : composé d'articulations rotoïdes et prismatiques, dont l'enveloppe de travail est un cylindre.
- Sphérique : composé d'articulations rotoïdes et prismatiques, dont l'enveloppe de travail est une sphère.
- SCARA¹⁰ : composé d'au moins deux articulations rotoïdes verticales pour déplacer l'effecteur dans le plan horizontal et d'une articulation prismatique verticale pour les déplacements verticaux.
- Articulé : composé généralement de 4 à 7 articulations rotoïdes arrangées en série.
- Parallèle : composé généralement de plusieurs chaînes d'articulations rotoïdes parallèles, liant l'effecteur à la base du robot.

Selon eux, les robots industriels les plus utilisés en pratique sont de type cartésien, SCARA, articulé ou parallèle. Ce sont également ces quatre types qui sont catégorisés par Hägele, Nilsson et Pires [HNP08] et par l'IFR [IFR16]. Ces quatre catégories de robots industriels sont illustrées sur la figure 2.1.



Figure 2.1 – Types de robots industriels classés suivant leur structure mécanique : de gauche à droite, cartésien, SCARA, articulé et parallèle.

La combinaison des déplacements articulaires d'un manipulateur donne les mouvements de l'effecteur dans l'espace opérationnel (ou espace cartésien). Les dimensions géométriques des liens entre les articulations et leur plage de mouvement définissent l'enveloppe de travail du robot. Le modèle géométrique du robot définit la relation entre les positions articulaires et cartésiennes pour des dimensions géométriques données [COW08]. La structure mécanique, les actionneurs et systèmes de transmission mécanique sont dimensionnés de manière à satisfaire les besoins en vitesse, charge, précision et performance dynamique pour la tâche à accomplir [AP08]. Pour cela on cherche généralement à maximiser la rigidité de la structure et des systèmes de transmission, et à réduire les jeux mécaniques et la masse des structures [SM08]. Pour augmenter l'espace de travail des robots industriels, ces derniers peuvent

10. Robot manipulateur polyvalent pour l'assemblage (Selective Compliance Assembly Robot Arm – SCARA)

être placés sur un robot mobile ou être combinés avec des axes additionnels de type swing (axe rotatif) ou portique cartésien (axes linéaires), comme illustré sur la figure 2.2.



Figure 2.2 – À gauche, le Kuka KMR iiwa, un robot industriel articulé monté sur un robot mobile. À droite, un robot industriel articulé monté sur des axes linéaires du constructeur Lucas France.

Effecteurs : Ce sont les outils placés au bout des robots industriels et qui permettent la réalisation de la tâche (soudage, préhension, peinture, inspection, etc.). Ils sont donc au plus proche – et souvent au contact – des pièces à manipuler, à transformer ou à contrôler. Lorsqu'une application nécessite la réalisation de plusieurs opérations différentes, les changeurs d'outils peuvent permettre de changer d'effecteur automatiquement.

Capteurs : L'utilisation de capteurs permet – en étant combinée à des algorithmes pour traiter les données et à une structure mécanique adaptée – d'accroître l'autonomie du robot pour réaliser des tâches. Cela peut aller aussi bien dans le sens d'un travail complètement automatisé, et donc sans humain, que dans le sens d'une collaboration plus fine ou plus naturelle avec les hommes [GMH⁺13].

Les capteurs pour la robotique sont variés, ils permettent au robot de connaître son état interne (par exemple les encodeurs permettent de connaître les positions articulaires) et d'effectuer des détections de l'environnement extérieur (par exemple une caméra et un scanner tridimensionnel pour connaître la position d'un objet, ou un capteur d'effort pour connaître les forces exercées sur/par des objets) [CH08].

Contrôle : Les robots sont programmés pour réaliser des tâches spécifiques ou de manière à pouvoir être adaptés à une variété de tâches. Pour une tâche donnée, une succession de consignes sont envoyées au robot. Le contrôle des robots – qui relève de la science de l'automatique – permet d'assurer le suivi de ces consignes. Ces consignes peuvent aller de couples moteur jusqu'au suivi d'une trajectoire en appliquant une force dans une direction, par exemple. Le contrôle et la programmation des robots sont détaillés dans la section 2.1.1.4 .

Interfaces : Les interfaces des robots sont variées et permettent leur communication avec d'autres composants¹¹ (capteurs, effecteurs et autres équipements) et avec les hommes. Les interfaces homme-robot sont des moyens spécifiques qui permettent à l'homme et au robot d'interagir. Celles-ci incluent le pendant d'apprentissage pour programmer par apprentissage les trajectoires et actions robot, les interfaces graphiques et les dispositifs de commande (joystick par exemple) dédiés à la réalisation des tâches.

11. Intégrés via les baies de commande pour les robots industriels.

2.1.1.4 Fonctionnement des robots

Contrôle des robots

Le contrôle des robots vise à assurer des mouvements et actions correspondant aux ordres (ou consignes) envoyées. Il existe principalement deux classes de contrôle des mouvements des robots manipulateurs industriels [CFH08] :

- atteindre et maintenir des positions ;
- suivre une trajectoire.

La première peut correspondre à des opérations de manipulation et transfert, de rivetage, ou d'inspection, tandis que la seconde est nécessaire pour des opérations de soudage, de découpe laser ou de peinture par exemple. Les trajectoires peuvent être générées en ligne (c'est-à-dire calculées en temps réel pendant le mouvement, pour éviter un obstacle mobile par exemple) ou hors ligne (calculées avant l'exécution du mouvement). Chung et ses collaborateurs récapitulent les différents contrôleurs qui existent et leur adaptation à l'une ou l'autre de ces classes de tâche [CFH08].

Lors de la programmation des robots manipulateurs, les positions de l'effecteur sont généralement spécifiées dans l'espace opérationnel (aussi appelé espace cartésien ou espace de la tâche). Deux modes de contrôle permettent d'atteindre une telle position [CFH08] :

- Dans l'espace articulaire : le modèle géométrique inverse du manipulateur permet de calculer la consigne dans l'espace articulaire à partir de la position cartésienne, et le contrôleur va assurer le suivi de cette consigne.
- Dans l'espace opérationnel : le contrôleur s'appuie sur la transformation des vitesses articulaires en vitesses cartésiennes (via la matrice jacobienne du robot) pour contrôler les mouvements de l'effecteur, directement dans l'espace de la tâche.

On retrouve ces deux modes de contrôle dans les interfaces de programmation des robots industriels, lors de l'apprentissage de points de passages. En effet, on peut généralement préciser si on souhaite atteindre chaque position avec un contrôle dans l'espace articulaire ou opérationnel. Ce dernier présente par exemple l'avantage de permettre de programmer des déplacements de l'effecteur en ligne droite.

Pour de nombreuses tâches, les robots peuvent être amenés à interagir avec des objets ou des personnes. Leur contrôle en position n'est alors plus suffisant et il devient nécessaire de maîtriser la force exercée par le robot sur son environnement. Pour cela différents types de contrôle ont été développés tels que le contrôle en impédance et le contrôle en force/position [VD08]. Des recherches ont également été menées pour minimiser les forces de contact et pour maîtriser les perturbations liées aux interactions avec l'environnement [MB94] [TLL⁺16].

Programmation des robots industriels

On retrouve généralement dans l'industrie deux manières de programmer les robots manipulateurs :

- Par apprentissage : les trajectoires et actions du robots sont apprises manuellement avec le pendant d'apprentissage.
- Hors-ligne¹² : un logiciel permet de programmer et de simuler le fonctionnement du robot dans la cellule virtuelle sur un ordinateur. Les programmes sont ensuite transférés sur la baie de commande.

Deisenroth et Krishnan présentent deux approches de programmation par apprentissage : l'une utilisant un pendant d'apprentissage pour programmer les points de passage et les actions, et l'autre utilisant une poignée sécurisée au niveau de l'effecteur du robot pour le guider [DK99]. Cette dernière permet d'enregistrer la trajectoire guidée et de l'intégrer au programme du robot avec un contrôle de suivi de trajectoire. Cette technique est utilisée pour des opérations de peinture par pulvérisation ou

12. C'est-à-dire hors de la ligne de production, sans utiliser le robot.

de soudage à l'arc par exemple. La programmation par guidage permet également d'enregistrer des points de passage, comme avec le pendant d'apprentissage.

La programmation par apprentissage présente l'avantage de pouvoir être réalisée par les opérateurs spécialistes de la tâche, mais qui ne sont pas formés à l'utilisation de logiciels ou de langage de programmation. La programmation par guidage est alors particulièrement intéressante pour des tâches où l'opérateur a une grande expertise dans son geste – telles que la peinture ou le soudage.

Cependant, la programmation par apprentissage nécessite l'arrêt de la production, puisque le robot est mobilisé pendant la programmation. Lorsque la tâche est complexe à programmer par apprentissage ou lorsque la production ne peut pas être arrêtée trop longtemps pour modifier les opérations, il est alors plus intéressant de programmer les robots hors-ligne. La programmation hors-ligne (PHL) consiste à développer les programmes du robot en utilisant un modèle numérique du robot et de son environnement.

Yong et Bonney [YB99] listent les avantages suivants de la programmation hors-ligne par rapport à la programmation par apprentissage :

- Réduction du temps d'arrêt des robots : permet de programmer des robots manipulateurs pour de nouvelles tâches alors qu'ils sont en fonctionnement.
- Retrait des programmeurs d'environnements potentiellement dangereux : en développant les programmes loin des robots pouvant avoir des comportements mal anticipés et présentant un risque pour l'homme.
- Système de programmation unifié : il est possible d'utiliser des logiciels de PHL qui font abstraction des spécificités de programmation des différentes marques de robot industriel.
- Intégration avec des systèmes de conception assistée par ordinateur (CAO) et fabrication assistée par ordinateur (FAO) : permet d'extraire des données issues des modèles numériques des pièces pour faciliter la programmation des robots.
- Simplification de tâches complexes : grâce à l'utilisation de langages informatiques de haut niveau pour décrire les opérations.
- Vérification des programmes robots : en simulant l'ensemble des opérations programmées dans un environnement virtuel, pour vérifier l'absence de collision par exemple.

Le deuxième et le dernier avantages sont discutables. En effet, le risque encouru par une personne, lors de la programmation d'un robot par apprentissage, peut être quasiment éliminé en se plaçant hors de portée du robot lorsque les trajectoires sont rejouées. De plus, lorsque les trajectoires sont programmées par apprentissage, il est possible de les rejouer à vitesse réduite pour vérifier l'absence de collision.

Néanmoins la PHL repose sur l'utilisation de modèles numériques des robots, des pièces et de l'environnement de travail, qui représentent difficilement les variabilités du monde réel. Par ailleurs, les imprécisions sur les modèles numériques (des robots et de l'environnement) peuvent générer des erreurs lors de l'exécution dans l'environnement réel. Différents travaux ont visé à réduire l'écart entre la programmation sur les modèles virtuels et l'exécution dans le monde réel, notamment :

- la calibration des robots avec leurs modèles et l'intégration des capteurs dans la simulation pour réguler les incertitudes [Rub99] ;
- l'utilisation de méthodes permettant de déterminer avec plus de précision la position des objets dans l'espace de travail [YB99].

2.1.2 Spécificités des cobots et des robots collaboratifs industriels

Historiquement, pour assurer la sécurité des hommes lors du fonctionnement des robots industriels, ces derniers étaient placés dans des zones séparées de l'homme physiquement (enceinte cartésienne) ou de manière immatérielle (barrières laser déclenchant l'arrêt du robot en cas de franchissement). Depuis quelques années, les cobots et les "robots collaboratifs" – que nous distinguons dans la suite de cette

section – sont déployés dans l'industrie. Ils peuvent être colocalisés¹³ avec l'homme sans barrière et permettent le plus souvent l'interaction physique de manière sécurisée.

Le terme cobot – néologisme issu de robot et collaboration – a été introduit en 1996, par Colgate, Wannasuphprasit et Peshking [CWP96], pour désigner un dispositif passif dont l'actionnement permet de contraindre et guider les mouvements d'une personne, en définissant des surfaces virtuelles. Le premier prototype de cobot qu'ils ont créé est présenté sur la figure 2.3. Avec Akella, ils ont défini la notion de cobot actif¹⁴ en 1999 [APC⁺99].

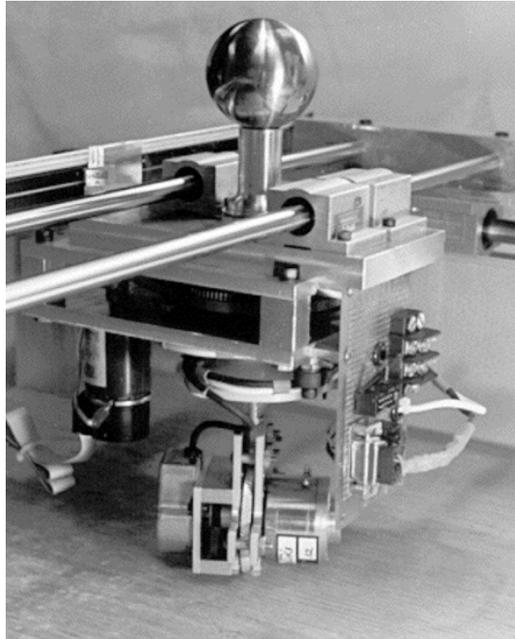


Figure 2.3 – Le premier prototype de cobot créé par Colgate, Wannasuphprasit et Peshking en 1996 [CWP96].

En 2008, la société danoise Universal Robots a commercialisé le premier "robot collaboratif" ("collaborative robot" en anglais), un robot industriel nommé UR5 pouvant détecter un contact physique avec une personne et s'arrêter. Ce premier robot industriel pouvant être présent à proximité des personnes sans barrière physique, a été suivi en 2011 par le "robot collaboratif" Baxter de Rethink Robotics, puis par le LBR iiwa de Kuka (voir figure 2.4). Depuis 2011, RB3D commercialise des manipulateurs pour l'assistance au port de charge ou à la manipulation d'outils. Le contrôle implémenté dans ces manipulateurs permet de compenser le poids et l'inertie des charges manipulées, de découpler les efforts appliqués par un opérateur et de guider ses mouvements à l'aide de guides virtuels. RB3D les qualifie de "cobots"¹⁵.

13. Dans le même espace de travail.

14. Un cobot actif peut apporter de l'énergie dans les déplacements et amplifier les efforts des opérateurs. Cette notion a été détaillée en 2001 par Peshkin et al. [PCW⁺01].

15. <http://www.rb3d.com/produits/cobots/>

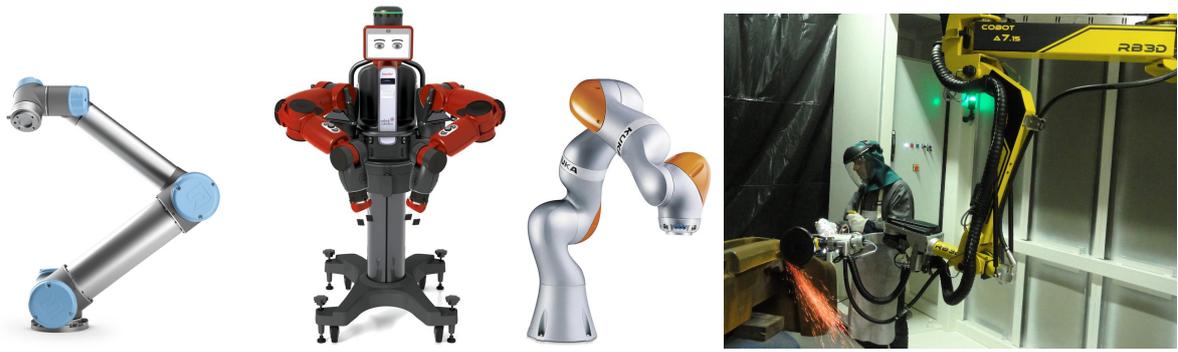


Figure 2.4 – De gauche à droite : l'UR5 d'Universal Robot, le premier "robot collaboratif" ; le Baxter de Rethink Robotics, un "robot collaboratif" bi-bras ; le "robot collaboratif" LBR iiwa de Kuka ; et le cobot manipulateur d'outil 7A15 de RB3D.

La notion de "collaborative robot" a été normalisée en 2011 avec la mise à jour des parties 1 et 2 de la norme ISO 10218¹⁶. Ce terme a été traduit dans la version française de la norme par "robot coopératif". Cette norme étend la définition des "robots coopératifs" aux quatre modes de fonctionnement suivants :

- arrêt contrôlé nominal de sécurité ;
- guidage manuel ;
- surveillance de la vitesse et de la séparation ;
- limitation de la puissance et de la force par conception ou par commande.

Le premier et le troisième mode spécifient respectivement que le robot doit s'arrêter ou ralentir lorsque l'homme pénètre dans l'espace de travail coopératif^{17 18}. Ces modes ne permettent donc pas en réalité la collaboration physique entre l'homme et le robot durant le fonctionnement. Le deuxième et le quatrième mode ouvrent la voie à l'application de l'interaction physique entre l'homme et le robot dans l'industrie.

Pour mettre en œuvre ces modes de fonctionnement coopératifs, la norme précise seulement que les robots et autres composants doivent respecter les exigences de sécurité, et que l'intégrateur doit conduire une analyse des risques de l'application. Ces modes de fonctionnement ont été précisés dans la spécification technique ISO/TS 15066:2016 [ISO16], qui donne des indications – dont les limites en pression et force pouvant être exercées pendant l'interaction physique – pour leur mise en œuvre sur des applications industrielles. Ces données varient en fonction de la région du corps humain potentiellement en contact¹⁹.

Malgré l'utilisation du terme coopératif dans les normes, c'est le terme de "robot collaboratif" qui s'est diffusé en France [Aco13][Lam16]. Depuis la parution de ces normes, de nombreux constructeurs de robots ont développé leurs gammes de "robots collaboratifs" pour répondre au marché en pleine expansion²⁰ : ABB avec le Yumi, Fanuc avec le CR-35iA, Yaskawa avec le Motoman HC10, ou encore Stäubli avec la gamme TX2. La plupart d'entre eux sont conçus pour réaliser le quatrième mode de fonctionnement coopératif spécifié par la norme, c'est-à-dire la limitation de la puissance et de la force.

Ces "robots collaboratifs" s'appuient sur des technologies spécifiques pour se démarquer des robots industriels classiques. L'évaluation des efforts appliqués par la structure du robot sur l'environnement extérieur est réalisée par la mesure des courants moteur (comme l'UR5, par exemple) ou par l'utilisation de capteurs de couple moteur au niveau de chaque articulation (comme le Kuka LBR iiwa, par exemple).

16. La déclinaison française a pour référence NF EN ISO 10218 [AFN11a] et [AFN11b].

17. La norme ISO 10218-2:2011 définit l'espace de travail coopératif comme l'« espace de travail à l'intérieur de l'espace contrôlé, dans lequel le robot et l'humain peuvent réaliser des tâches simultanément pendant le fonctionnement en production ».

18. La vitesse de fonctionnement des "robots collaboratifs" à proximité de l'homme est limitée à 250 mm.s^{-1} par défaut.

19. La pression autorisée varie de 110 N.cm^{-2} à 300 N.cm^{-2} et la force de contact de 65 N à 220 N .

20. <http://www.transparencymarketresearch.com/collaborative-robots-market.html>

Cette possibilité d'interagir physiquement avec le robot peut être exploitée pour programmer simplement des trajectoires du robot par guidage²¹. Cette capacité de programmer et reprogrammer facilement les "robots collaboratifs" sur des tâches simples est une des caractéristiques qui séduisent les industriels, dans la perspective de moyens de production plus agiles.

La modélisation détaillée du robot et l'amélioration de son contrôle permettent plus de précision dans l'évaluation des efforts appliqués par celui-ci, pour une interaction plus fine et sûre (on retrouve l'aboutissement de tels développements dans le Franka Emika). Certains constructeurs utilisent des protections en mousse pour rendre "collaboratifs" des robots à plus forte charge (comme Fanuc avec le CR-35iA ayant une charge utile de 35 kg). Comau s'appuie sur la combinaison d'une mousse de protection avec des capteurs tactiles et de proximité pour transformer des robots classiques de sa gamme en "robot collaboratif". Ils ont ainsi annoncé la commercialisation de plusieurs "robots collaboratifs" durant l'année 2018, l'un atteignant 110 kg de charge utile.



Figure 2.5 – Différents "robots collaboratifs". De gauche à droite : le Yumi d'ABB, le CR35ia de Fanuc, le Franka Emika de Kbee et le Aura de Comau.

Actuellement les "robots collaboratifs" ne sont pas toujours utilisés en collaboration avec l'homme. Ils sont principalement exploités par les industriels pour leur coût d'intégration plus faible que les robots manipulateurs classiques et pour leur empreinte au sol réduite. En effet, les "robots collaboratifs" intègrent des dispositifs de sécurité pour l'interaction qui réduisent la taille de la zone de sécurité nécessaire et le besoin de cartérisation. De plus, la programmation par guidage sur des tâches simples peut diminuer la durée et les coûts de mise en place.

Il existe, malgré tout, des développements industriels exploitant depuis quelques années les possibilités offertes par l'interaction physique entre le robot et l'homme. La collaboration homme-robot dans l'industrie a notamment été développée pour des opérations d'assemblage de pompes hydrauliques et de soudage à l'arc [HSH02b], et pour l'assemblage de pièces automobiles [MMS⁺14] [CPC⁺16].

Notons ici qu'une confusion est faite, dans l'industrie, entre les termes "cobot", "robot collaboratif" et "cobotique". Il n'est pas rare d'entendre les termes "robot collaboratif" et "cobot" utilisés indifféremment pour désigner les mêmes dispositifs. Le terme cobot est ainsi considéré comme un diminutif de "robot collaboratif". Le fait que cobot soit à l'origine un néologisme issu des termes "robot" et "collaboration" n'y est probablement pas étranger. Suivant la définition originale de Colgate et al., nous considérons que les cobots sont des robots pouvant interagir physiquement avec l'homme de manière sécurisée, et accompagner son geste à l'aide de surfaces et guides virtuels programmables. Nous nous rapprochons ainsi de la définition utilisée par RB3D pour désigner ses produits [Lam16].

Les cobots d'RB3D sont parfois qualifiés de dispositifs d'assistance physique car ils sont prévus pour un usage avec l'homme. Nous les considérons également comme des robots car ils mettent en œuvre une forme d'autonomie dans la collaboration avec l'homme, à travers les guides virtuels. Étant asservis, ils peuvent de plus réaliser des trajectoires programmées, sans l'intervention de l'homme.

Nous considérons les cobots et les "robots collaboratifs" comme des moyens techniques – des robots – pouvant être utilisés en collaboration homme-robot. Ces moyens techniques permettent en parti-

21. Si la programmation par guidage était historiquement possible, elle est devenue plus fluide avec l'évolution des technologies (précision des capteurs, algorithmes de contrôle, miniaturisation, allègement et rendement des actionneurs et transmission). On retrouve ces technologies nativement dans certains "robots collaboratifs" apparus récemment, tel que le Franka Emika.

culier de réaliser cette collaboration à travers des interactions physiques avec l'homme. Cependant, la collaboration homme-robot ne se restreint pas aux interactions physiques et peut s'appuyer sur d'autres types de moyens techniques et d'autres formes d'interaction, telle que la téléopération (voir section 2.2).

Dans la lignée de Claverie et al. [CLF13], nous considérons la cobotique comme le domaine de la collaboration homme-robot. La cobotique ne s'intéresse donc pas seulement au robot²², mais aussi à l'homme, à la tâche réalisée conjointement, et aux interactions²³ dans la collaboration. Dans cette thèse, nous restreignons cette étude à l'industrie. Nous précisons les notions d'interaction (section 2.2.2), de collaboration (section 2.2.3) et de système cobotique (section 2.2.4).

2.1.3 Proposition d'un modèle des systèmes robots appliqué à l'industrie

Afin de mieux cerner la contribution du robot dans l'interaction avec l'homme pour réaliser une tâche industrielle, nous avons cherché à définir un modèle des systèmes robots.

Rahimi et Karwowski ont proposé un diagramme pour représenter les fonctions d'un système homme-robot [RK90] (voir figure 2.6). Dans ce modèle les retours d'informations du système robot vers l'opérateur sont découpés en retours sonores et tactiles d'un côté, et retours visuels de l'autre. Les retours visuels sont rattachés seulement au manipulateur alors qu'ils peuvent également venir de l'interface homme-robot, à travers un écran affichant des données par exemple. Il utilise une même entité pour représenter les capteurs internes au robot permettant son asservissement et les capteurs externes servant aux interactions, à la sécurité ou pour la tâche. Enfin le manipulateur et ses actionneurs sont séparés, alors que les autres composants du manipulateur (pour la transmission par exemple) ne sont pas présentés. Aussi, d'autres composants d'un système robot tels que les effecteurs ou axes supplémentaires ne sont pas inclus dans ce modèle. Enfin, ce modèle ne couvre que les robots manipulateurs articulés, alors que nous nous intéressons également aux autres familles de robots utilisables dans l'industrie pour réaliser une tâche en collaboration avec l'homme.

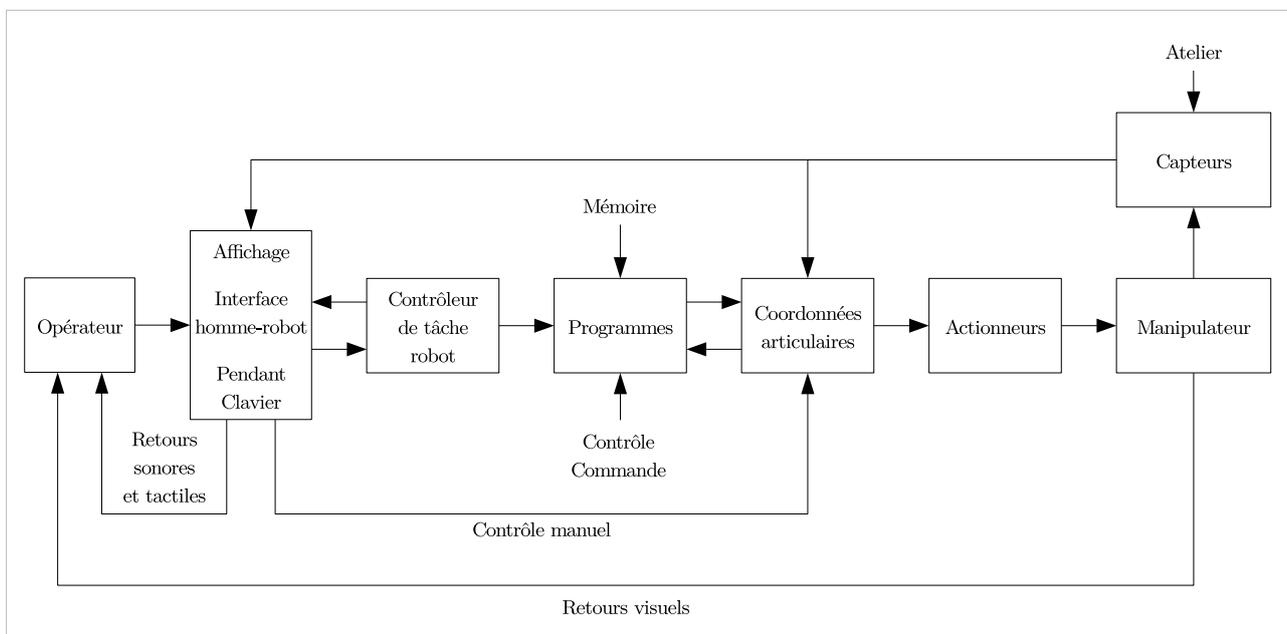


Figure 2.6 – Modèle des composants fonctionnels d'un système homme-robot, traduit de Rahimi et Karwowski [RK90].

Stadler a proposé un autre modèle des systèmes robots [Sta95] (figure 2.7). Celui-ci sépare les

22. Que ce soit un cobot, un "robot collaboratif" ou un robot téléopéré, par exemple.

23. Qu'elles soient physiques ou à distance.

capteurs internes au robot des capteurs externes récupérant des données sur l'environnement pour les transmettre au contrôle. Il fait apparaître l'effecteur et les composants périphériques qui agissent sur l'objet de la tâche, ainsi que son environnement. Cependant, ce modèle ne prend pas en compte les interactions avec l'homme. De même que le modèle précédent, il n'intègre pas d'éventuels axes supplémentaires et ne couvre pas de familles de robots autres que les manipulateurs.

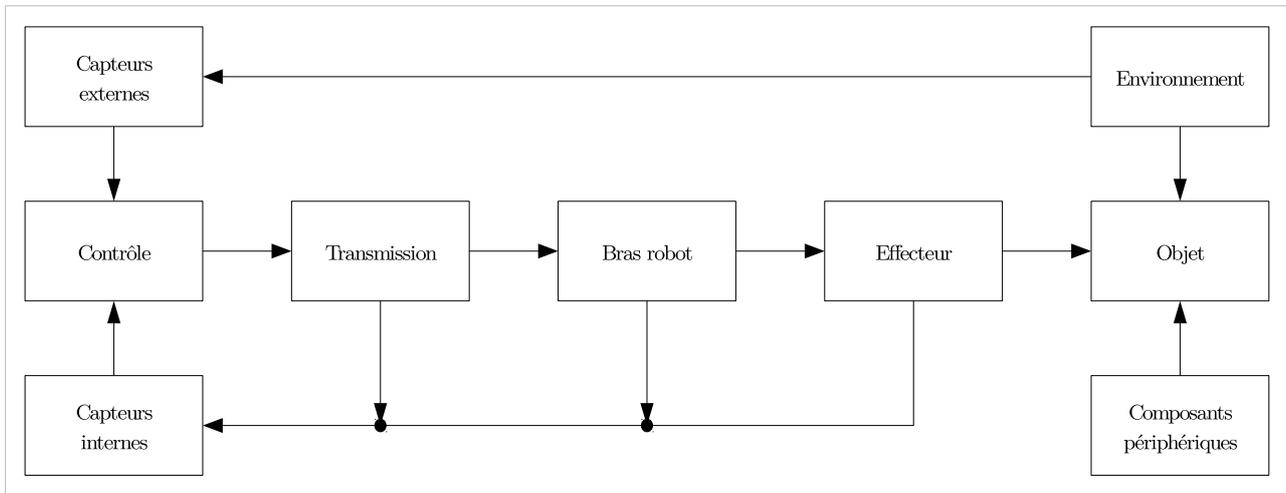


Figure 2.7 – Modèle d'un système robot, traduit de Stadler [Sta95], d'après Warnecke et ses collaborateurs [WSH⁺99].

Nous sommes donc reparti de ces modèles pour proposer un modèle d'un système robot plus générique, c'est-à-dire reprenant l'ensemble des composants d'un système robot défini dans la norme ISO 8373:2012 et couvrant les différentes familles de robot utilisées dans l'industrie (manipulateur, robot mobile et exosquelette). Ce modèle est représenté par la figure 2.8.

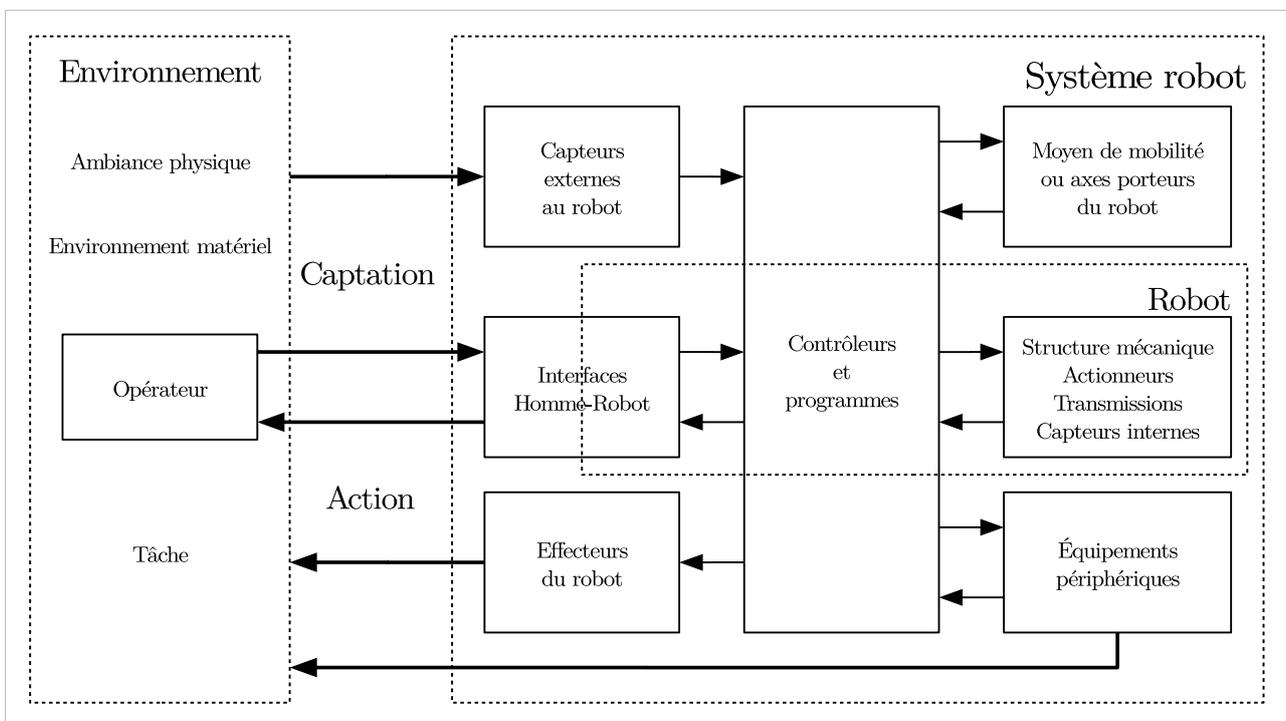


Figure 2.8 – Proposition d'un modèle d'architecture et de fonctionnement des systèmes robots.

Nous y distinguons le "robot" du "système robot", et affichons l'environnement dans lequel le système robot fonctionne. Le robot est ainsi constitué d'une structure mécanique, d'actionneurs, de systèmes

de transmission et de capteurs internes, qui sont mis en fonctionnement et asservis à l'aide d'un contrôleur et de programmes. Le robot peut également contenir des interfaces permettant d'interagir avec l'homme, notamment pour les "robots collaboratifs" et cobots. Le système robot regroupe, en plus, les éventuels moyens de mobilité ou axes supplémentaires, les capteurs externes au robot, les effecteurs et les équipements périphériques contribuant à la réalisation de la tâche. L'entité "contrôleurs et programmes" recouvre le robot et le système robot car d'autres contrôleurs que celui du robot peuvent être utilisés pour la coordination des éléments externes au robot. Par exemple, une cellule robotique peut contenir un contrôleur pour le robot et un autre pour l'asservissement des axes externes. Le système robot peut également comprendre des interfaces homme-robot qui ne font pas partie du robot. Par exemple, nous considérons qu'un joystick utilisé en téléopération fait partie du système robot mais pas du robot. Les équipements périphériques regroupent par exemple les changeurs d'outil automatiques, les convoyeurs, et d'autres machines nécessaires pour la réalisation de la tâche. En particulier, nous distinguons les axes motorisés supplémentaires permettant d'étendre l'espace de travail d'un robot manipulateur (que nous plaçons dans "moyen de mobilité ou axes porteurs du robot"), des axes externes servant par exemple à la rotation d'une pièce à travailler (que nous considérons comme "équipement périphérique").

Nous plaçons en regard du système robot, l'environnement dans lequel il évolue. Une des caractéristiques de l'environnement sont les ambiances physiques (telles que la chaleur, l'hygrométrie et l'atmosphère) qui peuvent avoir un impact sur la conception du système robot. Par exemple un environnement atmosphère explosible (ATEX) nécessite d'utiliser des robots ayant des protections particulières. Le système robot est implanté dans un environnement matériel qui contraint sa conception et son intégration. L'environnement matériel comprend par exemple les pièces à produire, les matières premières, les cloisons et le sol de l'atelier, les utilités industrielles ou encore des obstacles à éviter. Ainsi les capteurs du robot doivent être adaptés aux éléments à détecter, et les effecteurs et équipements périphériques doivent être adaptés aux produits à manipuler ou à transformer. L'entité "opérateur" représente le ou les opérateurs pouvant être amenés à interagir avec le système robot, que ce soit à travers une interface homme-robot spécifique, avec les capteurs externes, ou même avec les effecteurs du robot. Par exemple si l'opérateur interagit physiquement avec le robot, alors les effecteurs ne doivent pas présenter de danger pour l'opérateur, comme des arêtes tranchantes. La notion de tâche est définie dans la section 2.1.4.3. Le système robot est conçu de manière à répondre aux objectifs de la tâche et aux procédés à mettre en œuvre.

Les flèches indiquent les flux d'informations entre les composants du système robot, ainsi que les interactions avec l'environnement. Les interfaces homme-robot étant un canal privilégié pour les interactions du robot avec des personnes, nous les avons représentées par un lien direct avec l'entité "opérateur". Un lien bidirectionnel est représenté puisqu'un dispositif haptique, par exemple, permet à la fois de récupérer une force exercée par l'opérateur et de lui renvoyer une force. Les capteurs externes peuvent être utilisés pour capter des informations issues de l'homme (pour la sécurité par exemple), mais aussi plus généralement issues de l'ensemble de l'environnement (telles d'une température, la position d'une pièce, ou la mesure d'un paramètre prodédé). Le lien de "captation" est ainsi représenté de l'entité globale "environnement" vers l'entité "capteurs externes au robot". Les effecteurs du robot et les équipements périphériques peuvent agir sur l'ensemble des éléments de l'environnement, par exemple pour transporter une pièce, pour réaliser un procédé, ou en dégageant de la chaleur. Les liens d'"action" sont ainsi représentés depuis les entités "effecteurs du robot" et "équipements périphériques" vers l'entité globale "environnement". À l'intérieur du système robot, les contrôleurs utilisent les informations des capteurs et interfaces homme-robot pour commander le robot, les effecteurs et les autres équipements de manière à réaliser la tâche. Ce contrôle peut être effectué à partir de commandes envoyées par l'opérateur.

Notons que ce modèle s'applique aux robots manipulateurs, mais aussi aux robots mobiles et exosquelettes que l'on peut retrouver dans l'industrie. Pour ces deux dernières familles de robot, l'entité "moyen de mobilité ou axes porteurs du robot" n'est pas à considérer. En effet, la mobilité est alors réalisées à l'aide d'une structure mécanique, d'actionneurs et de systèmes de transmission propres au robot.

Le rôle des constructeurs de robots industriels est de concevoir et choisir la structure mécanique, les actionneurs, les transmissions mécaniques, les capteurs internes (position, vitesse, effort) et le système de contrôle pour satisfaire aux exigences de performance dynamique (vitesse, accélération, capacité de charge, efforts), d'enveloppe de travail, de précision, de répétabilité et de durée de vie des robots [SM08]. Dans le cas des "robots collaboratifs" et cobots, le constructeur va également développer les interfaces homme-robot.

Les intégrateurs vont, quant à eux, voir le robot comme un composant et s'intéresser au système robot, c'est-à-dire au choix et à l'intégration des robots, capteurs supplémentaires, effecteurs, programmes, interfaces homme-robot, moyen de mobilité, axes externes et autres composants (changeurs d'outil, alimentation et évacuation des pièces, et barrières de sécurité, par exemple) pour réaliser la tâche industrielle et assurer la sécurité.

L'objet de notre étude est la définition et l'utilisation de l'ensemble de ces composants dans le cadre d'une collaboration avec l'homme. Nous nous intéressons ainsi à la conception des systèmes homme-robot en étudiant leurs impacts :

- Pour l'homme : expertise, marge de manœuvre dans l'activité de travail, santé, sécurité, acceptabilité.
- Pour l'entreprise : coût, productivité, qualité, sécurité.

2.1.4 L'homme et l'automatisation

L'homme comme le robot peuvent réaliser une tâche, mais tous deux ont évidemment des caractéristiques et des besoins différents. L'introduction d'un système robot pour remplacer partiellement le travail de l'homme, ou pour collaborer avec lui, a des impacts qui ne doivent pas être négligés. Nous commencerons par éclairer les notions d'automatisation, d'automation, de robotisation et de cobotisation, avant de discuter des impacts de l'automatisation sur le travail des opérateurs. Enfin, pour avoir un support à la prise en compte de l'homme et de son activité de travail dans la conception d'un "système cobotique", nous allons décrire un modèle de l'homme au travail.

2.1.4.1 Automatisation, automation, robotisation et cobotisation

Claverie définit l'automatisation comme « la pratique permettant de rendre automatique un processus, ou l'état qui résulte du fait de l'automatiser », tandis que l'automation est « l'ensemble des processus automatiques substituant à l'homme des automates, c'est à dire des systèmes matériels réalisant un comportement automatique » [Cla05].

Ainsi d'après Claverie :

« C'est dans le cadre de l'automation industrielle que l'automatisation des processus, d'abord continus puis discontinus, a transformé les conditions de travail et le rôle de l'homme dans l'industrie. Il est passé du statut d'acteur à celui de concepteur, de superviseur, d'agent de maintenance ou de contrôle. Deux voies ont été choisies. La première correspond à l'automatisation des postes de travail, avec une dominante majeure en informatique, et a développé le domaine de l'interface entre l'homme et la machine. La seconde réside dans le maintien de l'organisation traditionnelle des chaînes de montage, en substituant à l'homme des automates particuliers, devant imiter le mouvement d'un homme, ayant parfois des qualités anthropomorphes, et qu'on appelle des robots. »

Cette thèse s'intéresse plus particulièrement à l'utilisation de robots pour l'automation, c'est-à-dire à la robotisation. Notre étude étant attachée à la collaboration entre les hommes et les robots pour réaliser des tâches industrielles, nous parlerons plus exactement de cobotisation. Cependant de nombreux concepts ont émergé de l'étude plus large de l'automatisation dans l'industrie et de ses impacts sur le travail des hommes, comme nous allons le voir dans les sections suivantes.

2.1.4.2 Impact de l'automatisation sur le travail

Depuis ses débuts, l'automatisation a éveillé de grandes attentes sur l'amélioration de l'efficience du travail, sur la réduction de la charge mentale pour les travailleurs, et sur l'élimination des variabilités et de "l'erreur humaine". Ces promesses ont conduit à la propagation rapide de l'automatisation dans de nombreux domaines pour laisser à l'homme les tâches non automatisables.

La première industrie concernée par une automatisation massive a été l'automobile. Elle en est aujourd'hui encore la première cible. L'impact de l'automatisation y a donc particulièrement été étudié depuis de nombreuses années. Une des principales difficultés soulignée concerne l'adaptation des organisations de travail suite à l'automatisation. Les conséquences pour les opérateurs sont une charge de travail supplémentaire [Bon84], ainsi que de nouvelles responsabilités et du stress [Eur84]. La faible prise en compte des variabilités industrielles lors de l'automatisation provoque des pannes machines, des accidents, un désengagement des opérateurs et des modifications en production qui sont coûteux pour l'entreprise et qui diminuent sa productivité.

Bainbridge [Bai83], puis Parasuraman et Riley [PR97], ont remarquablement contribué à la mise en valeur des risques de l'automatisation. La sous-estimation à la conception du rôle de l'homme dans la régulation des variabilités et des situations inattendues, ainsi que le manque d'anticipation de la transformation du travail et des nouvelles tâches introduites sont les causes principales des échecs de l'automatisation [LS09].

Au cours des quatre dernières décennies, les travaux issus des facteurs humains et des sciences cognitives appliqués à l'automatisation ont amené au développement de concepts²⁴ pour comprendre et anticiper la performance de l'homme dans des systèmes complexes [PSW08]. Ces concepts ont été appliqués aux études sur les interactions homme-robot [GS07]. Cependant ils sont principalement issus de travaux appliqués au contrôle du trafic aérien, à la conception des cockpits d'avion et dans le militaire.

L'ergonomie – ayant pour objet l'étude de l'homme au travail – a également développé des méthodes et concepts pour améliorer la performance et la santé de l'homme dans les systèmes de production. Ces méthodes et concepts ont été développés, en partie, pour l'industrie, qui est notre cadre d'étude. Ils prennent donc une grande importance dans notre approche. Dans la section suivante nous exposons un modèle de l'homme au travail qui tire ses inspirations de cette discipline.

2.1.4.3 Modèle de l'homme au travail

Afin de mieux comprendre le travail des opérateurs et ses déterminants pour la conception d'un système-robot, nous étudions ici un modèle de l'homme au travail. Pour la compréhension de ce qui suit, nous définissons d'abord les notions de tâche, activité, travail prescrit et travail réel, issues de l'ergonomie. La tâche à réaliser est une action (ou ensemble d'actions) que doit effectuer l'opérateur pour atteindre les objectifs de l'entreprise (travail prescrit), alors que l'activité de travail correspond à l'enchaînement de toutes les actions d'un travailleur au sein d'un système de travail (travail réel) [AFN09]. La tâche à réaliser est ainsi rattachée au travail prescrit, là où l'activité de travail correspond au travail réel.

Moulières-Seban discute dans sa thèse un modèle classiquement utilisé en ergonomie et une version simplifiée qui en est faite [MS17]. Nous reprenons ce dernier modèle sur la figure 2.9. Il montre la relation entre l'activité de travail, ses déterminants et ses conséquences pour l'opérateur et pour l'entreprise.

24. Confiance en l'automatisation (trust in automation) [LS04], conscience de la situation (situation awareness) [End95] et charge mentale (mental workload) [SS79].

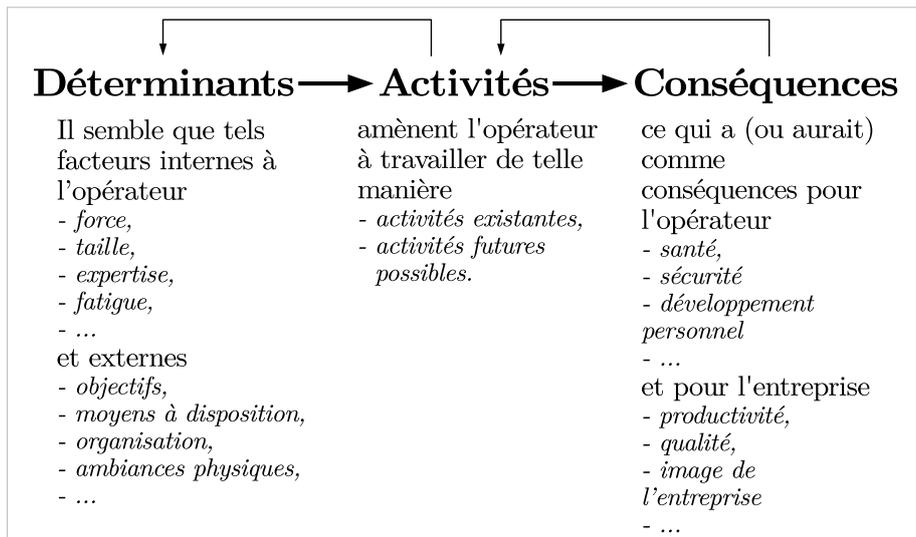


Figure 2.9 – Modèle de l'homme au travail, exposé dans la thèse de Moulières-Seban [MS17].

Les déterminants sont les paramètres qui influent sur l'activité. Ils sont soit liés à des facteurs internes à l'opérateur, soit à des facteurs externes (eux mêmes rattachés à l'entreprise, aux moyens disponibles, à la tâche à réaliser ou à l'environnement, par exemple). Les variations des déterminants de l'activité sont des variabilités auxquelles les opérateurs font face durant leur travail et qu'ils doivent réguler pour répondre aux exigences de l'entreprise, tout en veillant à la préservation de leur santé. Les variabilités liées aux opérateurs peuvent être inter-opérateurs²⁵ (force physique, capacités cognitives, taille, âge, sexe, par exemple) ou intra-opérateur²⁶ (fatigue, stress, charge de travail, charge cognitive, état émotionnel, par exemple). Les variabilités de déterminants externes peuvent être des aléas de production, des variations liées aux produits ou aux matières, une charge de travail supplémentaire due à une absence, une demande ponctuelle de réaliser une tâche spécifique, ou encore un fonctionnement en mode dégradé suite à un incident, par exemple. Durant son activité de travail, l'opérateur effectue ainsi des régulations en fonction des déterminants et de leur variabilités. Ces régulations sont illustrées par la flèche de rétroaction allant des activités vers les déterminants sur la figure 2.9.

L'opérateur effectue également des régulations au cours de son activité en fonction des conséquences de son travail pour lui-même et pour l'entreprise. Ces régulations sont illustrées par la flèche de rétroaction allant des conséquences vers les activités, sur le modèle de l'homme au travail. L'ensemble des régulations sur les déterminants et sur les conséquences permettent de gérer les situations de travail réelles, qui diffèrent bien souvent du travail prescrit, du fait des variabilités. La prise en compte de ces variabilités en conception est très importante, puisque un système de travail doit laisser suffisamment de marge de manœuvre aux opérateurs pour effectuer les régulations nécessaires [BVD14]. Sans cette marge de manœuvre, les opérateurs peuvent être amenés à compenser au détriment de leur état interne (stress, fatigue, par exemple) pour atteindre les résultats attendus. Par exemple, pour faire face à une contrainte de temps trop forte, un opérateur risque de s'épuiser plus rapidement pour suivre les cadences. S'ils n'ont pas les capacités de compenser en mobilisant des ressources internes, les résultats attendus (productivité, qualité) ne seront pas atteints.

2.2 La cobotique

Dans cette partie nous allons définir la cobotique et comment elle peut contribuer à la conception de la collaboration homme-robot dans l'industrie. Ainsi nous allons introduire la notion de "système cobotique" et en donner un modèle dans la section 2.2.4.

25. Les variabilités inter-opérateurs sont celles qui varient d'un opérateur à un autre.

26. Les variabilités intra-opérateur sont celles qui peuvent évoluer, pour un même opérateur, au cours de la journée ou en fonction de conditions extérieures.

2.2.1 Définition de la cobotique

D'après Claverie et ses collaborateurs [CLF13], la cobotique est une discipline émergente à visée opérationnelle, à l'interface de plusieurs disciplines (cognitive, facteur humain, biomécanique et robotique) qui s'intéresse à la relation entre les hommes et les robots, à leur collaboration. Cette collaboration est envisagée pour des interactions proches, voire physiques, comme pour des interactions à distance. Dans l'industrie, la cobotique s'appuie sur des solutions technologiques allant des exosquelettes aux robots téléopérés²⁷, en passant par les cobots et les "robots collaboratifs". Elle offre ainsi une réponse à des situations où l'opérateur est confronté à des tâches difficiles ou pénibles, lorsqu'il n'existe pas de solution robotique répondant au besoin²⁸.

La cobotique s'intéresse donc à la fois à l'homme, au système robot et à la tâche qu'ils réalisent. Chacun de ces éléments a été abordé dans les sections précédentes (voir section 2.1). Une des conditions de réussite de l'accomplissement de la tâche par l'homme et le robot est dans le développement de leur collaboration, qui passe par l'étude des interactions. Nous allons aborder les travaux sur les IHR et leur évolution vers l'étude de la collaboration homme-robot dans les sections suivantes. Nous intégrerons l'ensemble de ces éléments dans la définition d'un système cobotique (section 2.2.4).

2.2.2 Les interactions homme-robot

Dans cette section nous nous intéressons aux interactions homme-robot qui donnent les possibilités d'une collaboration. Nous commençons par en donner une définition dans la section 2.2.2.1, avant de caractériser leur conception dans la section 2.2.2.2. Dans la section 2.2.2.3, nous nous concentrons sur la téléopération, qui est une forme d'interaction à distance, et que nous avons plus particulièrement mis en œuvre dans nos applications.

2.2.2.1 Définition de l'interaction

En psychosociologie, Marc et Picard définissent l'interaction comme « un échange d'information, d'affect ou d'énergie entre deux agents au sein d'un système. C'est une action réciproque qui suppose l'entrée en contact de sujets » [MP02]. L'interaction entre l'homme et le robot peut donc être physique (échange d'énergie) ou non (échange d'information ou d'affect) et elle suppose la bilatéralité de la communication. Pour qu'il y ait interaction, l'homme doit donc pouvoir percevoir et/ou agir sur le robot et réciproquement.

Goodrich et Schultz séparent l'interaction homme-robot en deux catégories [GS07] :

- à distance : l'homme et le robot sont séparés spatialement ou temporellement (cas d'un robot téléopéré sur Mars) ;
- proche : l'homme et le robot sont colocalisés (ils partagent un espace commun).

Pour chacune de ces catégories ils distinguent les applications qui nécessitent de la mobilité, de la manipulation physique ou de l'interaction sociale. Il en résulte ainsi, d'après eux, les types d'interaction suivants :

- la téléopération ou le contrôle supervisé d'un robot mobile placé à distance ;
- la télémanipulation lorsqu'un robot manipulateur est utilisé pour réaliser des tâches de manipulation à distance ;
- l'interaction proche avec un robot mobile pouvant servir d'assistant ;
- et interaction sociale, émotive ou cognitive où l'homme et le robot sont le plus souvent proches.

Avec l'avènement de la robotique collaborative, nous pouvons ajouter à cette liste l'interaction physique avec les robots manipulateurs.

27. Commandés à distance.

28. Par exemple si l'opérateur possède une expertise qui n'est pas automatisable, ou si les coûts d'une robotisation sont trop élevés.

Le terme "télémnipulation" est utilisé pour des tâches spécifiques réalisées à distance avec un robot manipulateur ; le terme "téléopération" peut être utilisé plus généralement pour ces mêmes tâches. Dans cette thèse nous utiliserons les termes téléopération et contrôle supervisé aussi bien pour les robots manipulateurs que pour les robots mobiles. Nous n'utiliserons pas le terme de télémanipulation.

Dans l'industrie, on retrouve plus particulièrement des applications basées sur la téléopération ou le contrôle supervisé [GMG⁺10], sur la collaboration robotique colocalisée (avec un AGV par exemple, sans interaction physique), ou sur l'interaction physique (avec un cobot par exemple).

2.2.2.2 Conception des interactions

D'après Goodrich et Schultz la conception des interactions passe par la définition des attributs suivants [GS07] :

- l'autonomie des robots ;
- la nature de l'échange d'information ;
- la structure de l'équipe ;
- l'adaptation, l'apprentissage et la formation des hommes et des robots ;
- la transformation de la tâche.

Les travaux scientifiques initiaux sur les interactions homme-robot se sont concentrés sur ces trois premiers attributs, que nous détaillons dans les sections qui suivent. Le quatrième attribut a fait l'objet de travaux plus récents. Par exemple, Nikolaidis et Shah travaillent sur l'apprentissage mutuel homme-robot en s'inspirant de pratiques humaines d'apprentissage en équipe [NS13]. Cet attribut n'a pas été développé dans nos applications industrielles à ce stade, et nous ne le discuterons pas ici. Le dernier attribut rejoint en partie les travaux de l'ergonomie et nous l'intégrons dans notre modélisation des systèmes cobotiques (cf. section 2.2.4).

Autonomie des robots

L'autonomie peut se situer dans les différentes couches d'un système, allant du traitement de l'information locale d'un capteur, à des décisions haut niveau sur les objectifs globaux du système [NAS15]. Elle permet, d'une part, à des systèmes de fonctionner et de réaliser des tâches sans l'homme, et d'autre part, d'améliorer les capacités d'un système pour interagir de manière naturelle et efficace avec l'homme. C'est cette deuxième application de l'autonomie qui nous intéresse pour la collaboration homme-robot. L'autonomie permet d'adapter la nature de la collaboration, comme l'illustre l'échelle des interactions humaines avec un système autonome de Trafton et al. [TSC⁺06] (figure 2.10).

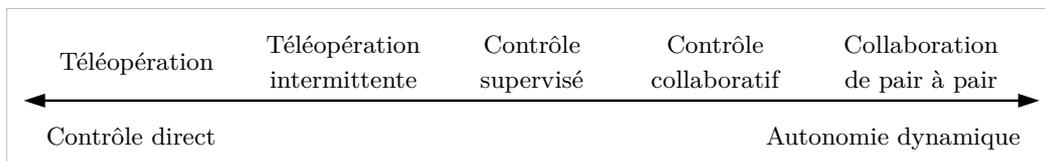


Figure 2.10 – Niveaux d'interaction de l'homme avec les systèmes autonomes, adapté de Trafton et al. [TSC⁺06].

Une des composantes de l'autonomie d'un robot est l'architecture logicielle qui détermine ses comportements en fonction de son état interne, des données issues des capteurs, et de ses capacités mécaniques et motrices. Les premières architectures logicielles implémentées étaient basées sur une approche captation-planification-action ("sense-plan-act" en anglais), qui découplait la réalisation des actions des données capteurs [KS08]. Cette approche présentait des risques dans un monde dynamique et manquait de réactivité. Elles ont ensuite évolué vers des architectures plus réactives de type subsomption ("subsumption" en anglais), mais qui rendaient difficile la planification et l'optimisation des comportements du robot pour atteindre des objectifs à plus long terme [KS08]. Des travaux plus récents ont

mené aux architectures en couches dont l'un des représentants est l'architecture trois tiers développée par Bonasso et ses collaborateurs [BFG⁺97]. La couche la plus basse de contrôle des comportements est au plus proche des capteurs et actionneurs et donne de la réactivité au robot. La couche intermédiaire permet de choisir les comportements adaptés pour réaliser une tâche. La dernière couche est responsable de la planification pour atteindre les objectifs à long terme en optimisant les ressources disponibles. Cette architecture a également servi de base au développement d'une architecture permettant l'interaction avec l'homme avec un niveau d'autonomie du robot adaptable [KBRS97]. On retrouve par exemple ce type d'architecture dans les robots d'exploration de la NASA [NAS15].

Ces architectures pour l'autonomie des robots sont pour l'instant peu répandues dans l'industrie où l'enchaînement des actions des robots industriels est généralement programmé pour être prévisible et répétable. Certains travaux visent cependant à donner plus de flexibilité à la production industrielle en définissant le concept de compétences ("skills" en anglais) pour les robots industriels [PNA⁺16]. Ces compétences sont semblables aux comportements définis dans l'architecture trois tiers. Leur enchaînement peut être fixé par programmation pour réaliser une tâche ou être planifié de manière dynamique en fonctionnement.

Échange d'information et dispositif de commande

D'après Goodrich et Schultz l'échange d'information est caractérisé par les supports de la communication et par son format [GS07]. Les supports correspondent aux sens de la vue, de l'ouïe et du toucher. Les différents types de supports sont l'affichage visuel, les gestes, la parole et le langage naturel, le son, et les interactions physiques et haptiques. Le format correspond à la manière dont est présenté l'information et dépend du support de communication.

Indépendamment du support de communication, un moyen d'interaction peut permettre la communication de l'homme vers le robot (clavier, souris, bouton, joystick, capture de mouvement, capteur de proximité, par exemple), du robot vers l'homme (écran, voyant, alarme, par exemple) ou dans les deux sens (écran tactile, joystick à retour de force, dispositif haptique, par exemple). Un dispositif peut combiner plusieurs moyens d'interaction. Par exemple, un pendant d'apprentissage peut combiner un écran tactile et des boutons physiques.

Dans la suite de cette thèse nous appellerons "dispositif de commande" un dispositif physique permettant à l'opérateur d'envoyer des commandes au système robotique (par exemple un clavier, un pendant d'apprentissage, un joystick ou un bras haptique), que ce soient des consignes en position/vitesse/force ou des commandes d'exécution d'action à plus haut niveau. Nous utiliserons ce terme aussi bien pour les dispositifs permettant l'interaction de l'homme vers le robot que dans les deux sens.

Structure de l'équipe homme-robot

La structure de l'équipe correspond au nombre d'hommes et de robots qui sont impliqués, à leur lien et à la répartition de l'autorité. Dans cette thèse appliquée à l'industrie, nous restreignons notre étude aux équipes constituées d'un homme et d'un robot. L'autorité peut se situer à différents niveaux de décision (stratégique, tactique ou opérationnel) [GS07]. Le concept de niveau d'automatisation développé par Sheridan et Verplank [SV78], et repris par Parasuraman, Sheridan et Wickens [PSW00], montre que la répartition de l'autorité entre l'homme et le robot peut varier de manière continue. L'échelle d'automatisation de la décision de Sheridan et Verplank illustre cette variation suivant dix niveaux (voir tableau 2.1). Au premier niveau le robot n'offre aucune assistance à la décision de l'homme, et au dernier, l'homme n'a plus de pouvoir dans la décision.

Dans la structuration de l'équipe homme-robot, de nombreux travaux ont cherché à guider la répartition des fonctions homme-robot. Fitts [Fit51] a été l'un des précurseurs en proposant une liste²⁹ identifiant les tâches pour lesquelles les hommes sont meilleurs et celles pour lesquelles les machines sont

29. Cette liste est souvent reprise dans la littérature sous le terme de Fitts's list (la liste de Fitts).

Haut

10. L'ordinateur décide de tout, est autonome, et ignore l'homme.
9. L'ordinateur informe l'homme seulement si l'ordinateur le décide.
8. L'ordinateur informe l'homme seulement si l'homme le demande.
7. L'ordinateur exécute de façon automatique, puis informe systématiquement l'homme.
6. L'ordinateur laisse un droit de veto à l'homme sur une durée déterminée avant exécution automatique.
5. L'ordinateur exécute son programme si l'homme approuve.
4. L'ordinateur suggère une alternative.
3. L'ordinateur réduit la sélection à une courte liste de possibilités d'exécution.
2. L'ordinateur offre un panel complet de décision, d'alternatives pour l'exécution.
1. L'ordinateur n'offre aucune assistance; l'homme doit prendre toutes les décisions.

Bas**Tableau 2.1 – Les niveaux d'automatisation, adapté de Sheridan et Verplank [SV78].**

meilleures. Dans cette lignée, Nof et ses collaborateurs [NKS80] ont proposé un tableau de comparaison détaillé des capacités physiques et cognitives des hommes et des robots pour aider les concepteurs à choisir qui affecter à une tâche.

Un des défauts de ce tableau de comparaison homme-robot³⁰, est qu'il est dépassé par l'évolution rapide des technologies. Plus généralement, ces outils d'aide à la conception des systèmes homme-robot de type MABA-MABA³¹ ont été vivement critiqués, notamment par Dekker et Woods [DW02]. D'après Dekker et Woods, ces outils de répartition de fonctions entre l'homme et la machine sont basés sur une simplification des systèmes homme-machine, suggérant que l'homme peut être simplement substitué par une machine avec des capacités similaires, alors que de nouvelles fonctions émergent de l'automatisation. Ils négligent les conséquences de l'automatisation sur la transformation de la tâche et des situations de travail, transformant les pratiques des hommes. Les hommes deviennent alors responsables de ce qui n'a pas été automatisé et doivent compenser les limites des machines dans la gestion des variabilités et les événements imprévus. Lee et Seppelt [LS09] préconisent d'adopter une approche de conception s'intéressant au système homme-robot, en prévoyant de la marge de manœuvre aux opérateurs pour compenser les limites des robots, et en les aidant à exploiter pleinement les capacités robotiques.

Intégrant les critiques des méthodes de répartition statique³² des fonctions entre l'homme et le robot, la recherche sur les interactions homme-automatisation a évolué vers le développement d'approches pour l'automatisation adaptative ("adaptive automation", en anglais) [HJP⁺13]. Ces nouvelles approches visent à adapter dynamiquement l'automatisation aux besoins de l'homme qui évoluent dans le temps pour la régulation des tâches complexes.

Suivant les expériences tirées de la recherche sur les relations entre l'homme et l'automatisation, nous étudierons de manière globale le système homme-robot collaborant pour réaliser une tâche dans l'industrie. Afin de considérer de manière conjointe l'homme, le robot et leur collaboration dans la réalisation de la tâche, nous définirons le concept de système cobotique (section 2.2.4) qui servira de support à notre étude. Par ailleurs, plutôt que nous intéresser à la répartition des fonctions entre l'homme et le robot, nous étudierons leurs rôles en considérant qu'ils peuvent varier au cours de la collaboration. Contrairement à l'étude des fonctions³³, l'étude des rôles permet d'envisager la contribution de l'homme et du robot de manière globale (voir section 2.2.3.2).

Avant de nous attarder sur la collaboration, et sur les rôles de l'homme et du robot, nous nous intéressons dans la section suivante à la téléopération qui est une forme d'interaction particulièrement présente dans nos cas d'application.

30. Nommé Robot-Human Charts (RMC) par Nof [NKS80].

31. Men-Are-Better-At/Machines-Are-Better-At (les hommes sont meilleurs à/les machines sont meilleurs à)

32. C'est-à-dire fixée à la conception et figée dans le temps.

33. Qui est notamment critiquée car elle consiste à découper la contribution de l'homme, dans la réalisation d'une tâche, en fonctions considérés indépendamment.

2.2.2.3 Cas de la téléopération

La téléopération est une forme d'interaction à distance que l'on retrouve dans différents champs d'applications [BS09] : l'industrie et la construction (inspection, réparation, maintenance dans des lieux difficiles d'accès ou hostiles³⁴), l'exploitation minière, les opérations sous-marines, le spatial, la chirurgie, l'assistance, le déminage, et l'éducation. Très présente dans les cas d'applications étudiés au cours de cette thèse, nous en développons les principes ici.

Les interactions à distance varient du contrôle direct³⁵ au contrôle supervisé, en passant par différentes formes de partage des fonctions et de l'autorité entre l'homme et le robot (voir figure 2.11).

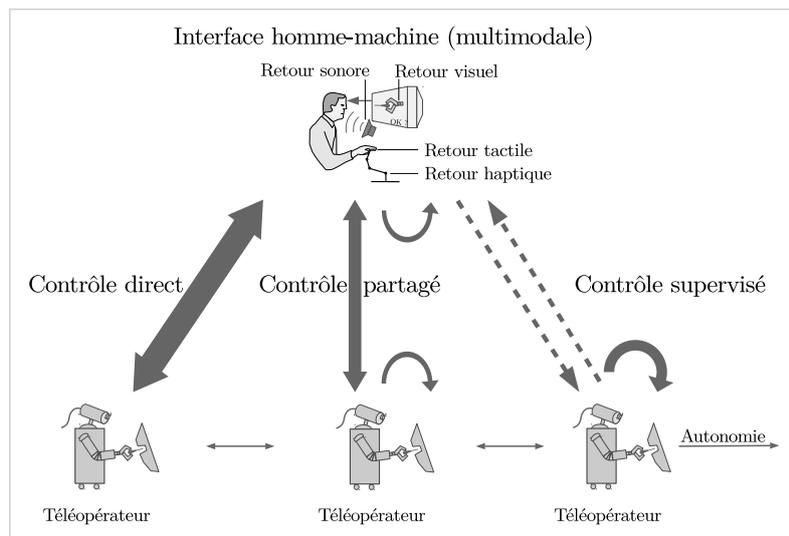


Figure 2.11 – Différentes architecture de contrôle en télérobotique, adapté de Sheridan [She92].

En téléopération l'autorité est laissée à l'homme dans les différents niveaux de décision. Sans commande de l'homme le robot n'effectue pas d'action. À l'opposé, en contrôle supervisé l'homme garde l'autorité dans les plus hauts niveaux de décision³⁶, mais le robot effectue des actions avec une certaine autonomie en suivant les commandes de l'opérateur. La téléopération est particulièrement adaptée à l'intervention dans les milieux hostiles pour l'homme mais où les tâches ne peuvent être automatisées. Les premiers développements des systèmes de téléopération ont notamment visé l'exploitation d'installations nucléaires. D'après Garrec et ses collègues [GMG⁺10], on y trouve les solutions les plus abouties, robustes et sophistiquées.

Les retours d'informations transmis à l'opérateur en téléopération sont généralement visuels (en vision directe, à travers des caméras ou avec des moyens de réalité virtuelle), haptiques (retour d'effort et tactile) et sonores [GRDM10]. Différents dispositifs de commande permettent d'interagir à distance avec un robot. Pour commander un robot manipulateur esclave, les dispositifs maîtres peuvent être une souris 6D (SpaceMouse), des joysticks ou des bras haptiques par exemple [NPH08]. L'industrie nucléaire a principalement développé et exploité les télémanipulateurs maître-esclave à retour d'effort³⁷. Leur technologie a évolué des télémanipulateurs maître-esclave à commande mécanique, aux servo-manipulateurs, jusqu'aux télémanipulateurs maître-esclave assistés par ordinateur qui se développent depuis les années 1980 [GRDM10]. La téléopération assistée par ordinateur (TAO) permet d'utiliser des bras maître et esclave avec des architectures matérielles différentes. De plus, l'utilisation d'un ordinateur pour le traitement des informations (capteur ou dispositif de commande) et pour le calcul

34. Notamment dans l'industrie nucléaire ou pour la maintenance de lignes électriques.

35. Ce terme est utilisé par Sheridan pour qualifier le contrôle direct de l'homme sur le robot à distance, par opposition au contrôle supervisé [She92]. Dans cette thèse, nous utiliserons le terme de téléopération.

36. Le plus élevé étant le niveau de décision stratégique.

37. Ensemble de deux manipulateurs – maître et esclave – reliés par des technologies de transmission ou actionnement permettant d'avoir un retour d'effort [GRDM10].

des commandes et asservissements offre des possibilités d'assistance à la téléopération. En intégrant la simulation de scènes virtuelles, il est possible d'augmenter les retours d'informations aux opérateurs, de prévenir des collisions et d'ajouter des guides virtuels [GRMA10]. Ces simulations peuvent également servir à la formation d'opérateur hors-ligne sur l'environnement virtuel (dont le bras esclave) avec un bras maître réel.

Un des objectifs principaux de la téléopération est de donner aux personnes la sensation de téléprésence, c'est-à-dire de percevoir et manipuler l'environnement distant comme s'ils y étaient [NPH08]. On parle de transparence du système de téléopération. Le choix et la conception des dispositifs de commande (tel qu'une interface haptique), du robot manipulateur esclave et de la loi de commande visent ainsi à transmettre intégralement les déplacements et les efforts sans introduire de perturbation pour l'opérateur [GRDM10]. La conception des retours d'informations (haptiques, visuels et sonores) contribue également à la sensation de téléprésence. Le second critère principal de conception d'un système de téléopération à retour d'effort est la stabilité [GRMA10]. La conception de systèmes passifs – c'est-à-dire qui absorbent plus d'énergie qu'ils en produisent – garantit leur stabilité. Cependant, la stabilité et la transparence sont des objectifs conflictuels, nécessitant des compromis lors de la conception des systèmes de téléopération et de leur loi de commande [Law93].

Les notions présentées dans cette section serviront de support à la conception et à l'évaluation des interactions en téléopération. Nous allons aborder, dans les sections suivantes, l'intégration des interactions dans la conception plus globale de la collaboration homme-robot.

2.2.3 Vers l'étude de la collaboration homme-robot

Dans cette section nous allons voir comment les IHR peuvent être utilisées pour la collaboration homme-robot. Nous allons ainsi les lier aux notions de tâche, d'autonomie du robot et de rôles.

2.2.3.1 Définition de la collaboration

Étymologiquement collaborer (con laborare en latin) signifie "travailler avec". Grosz précise que la collaboration implique d'avoir un but en commun [Gro96], elle va donc plus loin que l'interaction (échange d'information, d'énergie ou d'affects). Nous utiliserons ici le terme collaboration pour désigner le travail de plusieurs agents dans la réalisation d'une tâche commune [Ter95]. De plus, nous considérerons que les buts d'un robot, fixés par l'homme au préalable ou en ligne lors de l'activité de travail, constituent des buts propres. Ainsi, dès lors que l'homme et le robot programmé ont une tâche commune, ils collaborent. Nous excluons donc les systèmes d'assistance de type manipulateur ou exosquelette passifs qui ne peuvent pas contribuer à une collaboration. En effet, on ne peut pas leur attribuer de but propre puisqu'ils ne sont pas programmables ni asservis. Pour ces mêmes raisons, nous ne les considérons pas comme des robots.

2.2.3.2 Rôles de l'homme et du robot

Comme nous l'avons déjà évoqué, l'homme et le robot peuvent avoir différents rôles dans la collaboration. Scholtz liste les rôles suivants pour l'homme en interaction avec un robot mobile [Sch03] :

- superviseur ;
- opérateur (agissant sur le logiciel ou le matériel) ;
- coéquipier ;
- passant ³⁸.

Pour les définir il s'appuie sur les travaux de Norman sur l'interaction homme-ordinateur [Nor88]. Norman donne sept étages pour cette interaction :

³⁸. Le terme "passant" est ici entendu au sens d'une personne étant à proximité du robot, sans connaître ses buts ou ses intentions, et pouvant modifier les actions du robot.

- formulation du but (haut niveau) ;
- formulation de l'intention (manière de satisfaire le but) ;
- spécification des actions nécessaires pour réaliser cette intention ;
- exécution des actions ;
- perception de l'état du système ;
- interprétation de l'état du système ;
- évaluation du résultat de l'action (pour éventuellement enchaîner sur la suivante).

Notons que la séparation entre ces différents étages n'est pas triviale. Par exemple, chez l'homme la perception et l'interprétation d'informations sont des processus cognitifs fortement corrélés.

Les rôles définis par Scholtz varient en fonction des étages auxquels se situent les interactions. Par exemple, en fonction des résultats de l'action, le "superviseur" pourra redéfinir l'intention voire le but, alors que l'"opérateur"³⁹ va interagir au niveau de l'exécution des actions. De même que le "superviseur", le "coéquipier" interagit avec le robot au niveau du but ou de l'intention, bien qu'il n'ait pas l'autorité pour les altérer. Il peut, par exemple, demander au robot de réaliser une série d'actions permettant d'atteindre le but fixé préalablement. Le "passant" peut interagir avec le robot au niveau des actions, sans avoir conscience des capacités du robot. Il pourra par exemple causer l'arrêt ou le ralentissement du robot en s'en approchant.

Avec le rôle d'"opérateur", les actions du robot peuvent être modifiées en fonctionnement. Nous proposons de subdiviser le rôle d'"opérateur" en distinguant deux types d'intervention de l'homme :

- guide ;
- pilote.

Le rôle de "pilote" consiste à spécifier et commander l'ensemble des actions du robot. Le rôle de "guide" consiste à modifier ou orienter les actions du robot en cours de fonctionnement pour atteindre les objectifs. Par exemple, pour la réalisation d'une tâche en téléopération, le rôle de "pilote" consiste à commander directement les mouvements et actions du robot à l'aide de dispositifs appropriés (joysticks ou bras haptique par exemple). On parlera de "guide" si, par exemple, le robot réalise des trajectoires ou actions pouvant être corrigées en temps réel par l'homme. Nous utiliserons ces deux rôles complémentaires en substitution du rôle d'"opérateur" défini par Scholtz.

Les rôles peuvent être généralisés aux autres familles de robot, telles que les manipulateurs. En effet, une personne peut passer à proximité d'un robot manipulateur (qualifié de collaboratif) en fonctionnement, superviser son comportement général, en être coéquipier sur une ligne de production, ou guider/piloter ses actions à plus bas niveau. Chacun de ces rôles peut s'appliquer aussi bien en interaction à proximité, qu'à distance. Les rôles de l'homme et du robot sont complémentaires dans la collaboration. Par exemple, lorsque l'homme est "guide" ou "pilote", le robot est un assistant, et lorsque l'homme est "coéquipier", le robot est également coéquipier. Nous nous attacherons à la description du rôle de l'homme.

Ces rôles dénotent d'une intervention plus ou moins forte de l'homme dans la collaboration. En effet, selon le rôle de l'homme, le système peut fonctionner plus ou moins bien seul. Si le rôle de "passant" n'est pas assuré, le robot pourra continuer à fonctionner sans perturbation. Par exemple, un robot réalisant une tâche de manipulation d'objets dans un lieu public, étant programmé pour tendre l'objet saisi lorsqu'il détecte une personne à proximité, poursuivra sa tâche si personne ne s'approche. Si le rôle de "superviseur" n'est pas assuré, le robot pourra effectuer des actions contribuant à la réalisation de la tâche, mais les éventuelles erreurs ne seront pas détectées et le robot pourrait s'arrêter en l'attente de directives de l'homme. Si le rôle de "coéquipier" n'est pas assuré, les opérations robotiques pourront éventuellement être faites, mais celles de l'homme manqueront pour atteindre le résultat final. Si le rôle de "guide" n'est pas assuré, le robot ne pourra pas compléter l'ensemble des actions nécessaires. Enfin, si l'opérateur n'assure pas son rôle de "pilote", le robot n'effectuera aucune action.

³⁹. Ici "opérateur" est entendu au sens du rôle défini par Scholtz, et pas au sens de travailleur en production que nous utilisons dans le reste de la thèse.

L'autonomie du robot peut varier indépendamment du rôle de l'homme. Par exemple, pour réaliser une tâche en comanipulation, l'homme peut avoir un rôle de "pilote", c'est-à-dire que l'ensemble des déplacements est réalisé sous la commande de l'homme. Un robot ayant peu d'autonomie peut simplement être asservi suivant une commande en vitesse dans une direction donnée par l'homme. Un robot avec plus d'autonomie pourra compenser activement le poids et l'inertie d'une pièce portée afin de faciliter sa manipulation par l'homme, gérer l'évitement d'obstacle, amplifier les efforts de l'homme ou fournir des guides virtuels, par exemple.

Claverie et ses collaborateurs ont proposé une représentation des qualités et capacités des robots suivant deux axes [CLF13]. L'un concerne l'implication de l'homme dans le système, et l'autre concerne son autonomie, d'après Moulières-Seban [MS17]. Nous nous appuyons sur ces travaux pour représenter les rôles de l'homme et du robot dans la collaboration (figure 2.12).

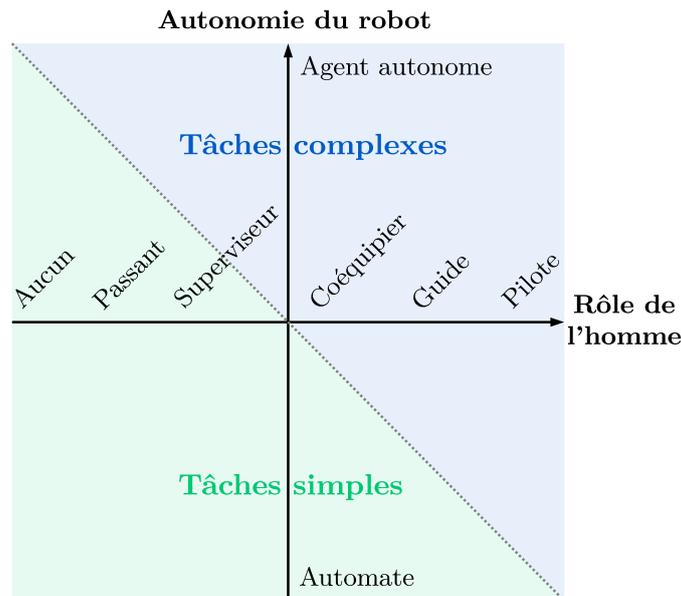


Figure 2.12 – Représentation du système homme-robot en fonction de l'autonomie du robot et du rôle de l'homme.

La contribution du robot est exprimée à travers son autonomie, et celle de l'homme suivant les rôles que nous avons décrits précédemment. Cette représentation illustre que la gestion de la complexité des tâches peut se faire en développant l'autonomie du robot ou par une implication plus forte de l'homme dans la collaboration.

2.2.4 Modélisation des systèmes cobotiques

La modélisation permet de décrire, d'expliquer et de donner des prédictions sur la forme et le fonctionnement d'un système [Lep03]. Appliquée à la conception de la collaboration homme-robot, la modélisation peut permettre de décrire et d'expliquer les rôles de l'homme et du robot dans la réalisation de la tâche, et servir de support pour prédire le fonctionnement futur du système. Nous allons ainsi développer la notion de système cobotique, et en proposer un modèle.

Le système cobotique est un système au sein duquel homme et robot interagissent pour satisfaire un but commun. Ce but est englobé dans la notion de tâche à réaliser. La tâche regroupe les objectifs et les opérations (le procédé) permettant de les atteindre. Ainsi, par l'étude du système cobotique, nous nous intéressons à la tâche, au système robotique, à l'homme, et à la manière dont ils réalisent la tâche ensemble.

Helms, Schraft et Hägele proposent une représentation de la relation entre l'homme, le robot (qualifié d'assistant) et le procédé [HSH02b] (voir figure 2.13). Ils définissent le robot assistant comme un

dispositif flexible, interagissant de manière directe, qui fournit une assistance en captation, en actionnement et en traitement d'information. La représentation qu'ils proposent est utilisée pour identifier les fonctions sur lesquelles l'homme peut être assisté ou substitué par le robot. Cette représentation se base sur une vision simplifiée du travail de l'homme, consistant à récupérer des informations issues de la réalisation du procédé et à effectuer des actions. Les processus de régulations des variabilités, discutés précédemment (section 2.1.4.3), ne sont pas pris en compte. Helms et ses collaborateurs étudient ainsi comment les capteurs, actionneurs et traitements de l'information du robot, peuvent remplacer ou augmenter les capacités de l'homme, sans prendre en compte l'impact de l'introduction du robot assistant sur la transformation de l'activité de travail. Nous avons discuté précédemment (section 2.2.2.2) de ces approches de la conception de la collaboration homme-robot critiquées notamment par Dekker et Woods [DW02]. Cette représentation n'intègre pas non plus l'environnement dans lequel le travail est réalisé.

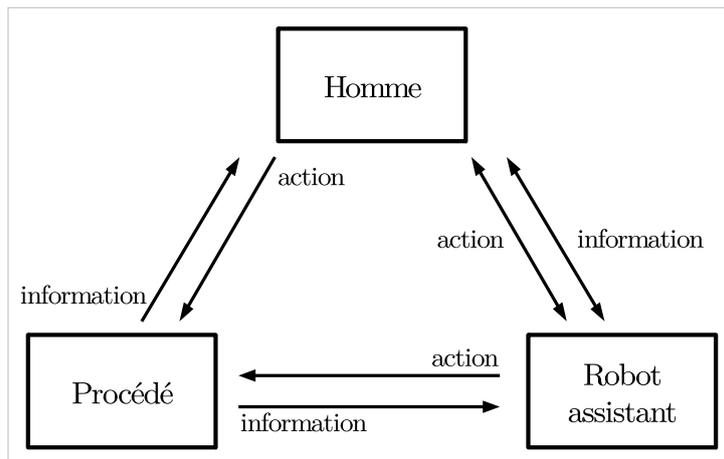


Figure 2.13 – Relation entre l'homme, le robot assistant et le procédé, adapté de Helms, Schraft et Hägele [HSH02b].

La modélisation d'un système cobotique que nous proposons est le fruit d'un travail interdisciplinaire, prenant en compte conjointement l'homme, le robot, et la tâche, à partir de compétences en cognitive, robotique et ergonomie. L'équipe homme-robot effectue des régulations au sein du système cobotique, en fonction de la tâche à réaliser et de ses déterminants. Cette vision, se rapprochant des travaux de la cybernétique, est décrite plus en détail dans la thèse de Moulières-Seban [MS17] et est illustrée sur la figure 2.14.

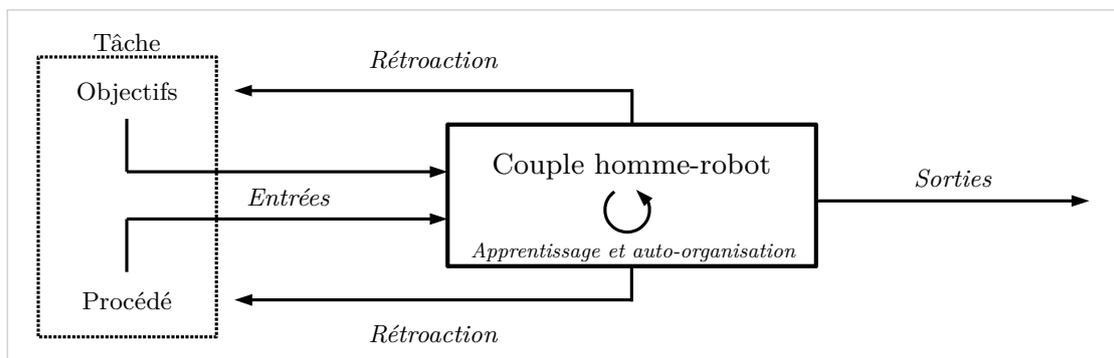


Figure 2.14 – Schéma cybernétique du système cobotique.

Pour mieux représenter les rôles de l'homme et du robot et leur activité conjointe pour réaliser la tâche, nous nous appuyons sur le modèle de système robot défini précédemment (voir section 2.1.3) et sur un modèle de la cognition de l'homme, défini par Moulières-Seban [MS17]. Nous intégrons de manière simplifiée ces modèles dans une représentation de la structure et du fonctionnement d'un système cobotique, schématisé sur la figure 2.15.

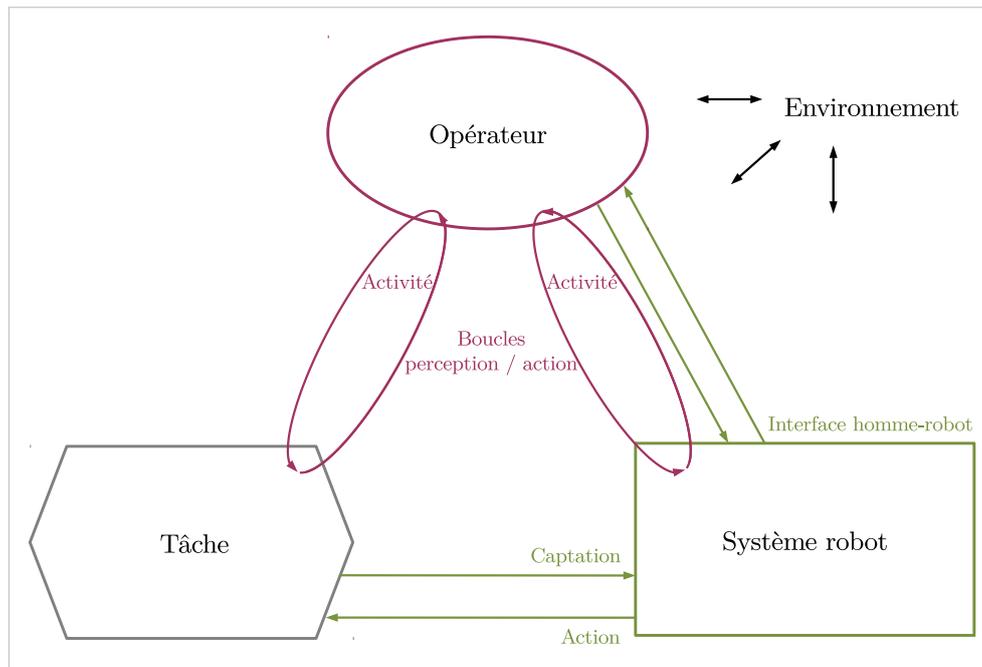


Figure 2.15 – Modèle du système cobotique dans lequel l’homme et un système robot collaborent pour réaliser une tâche.

L’activité de travail de l’opérateur au sein du système cobotique émane à la fois de la réalisation de la tâche, et de la collaboration avec le système robot. Le système robot doit être doté de capacités de captation, d’action et d’autonomie pour contribuer à la réalisation de la tâche et pour permettre la collaboration avec l’opérateur. Les boucles perception/action de l’homme résultent de processus cognitifs complexes, qui ne sont pas de même nature que les capacités de captation et d’action du robot. Ainsi nous les représentons délibérément avec des flèches de formes et de couleurs différentes sur notre modèle. Cette collaboration s’effectue dans un environnement qui a des effets sur l’homme, sur la tâche et sur le système robot à concevoir.

Les trois entités, l’opérateur, le système robot et la tâche, ont des propriétés matérielles et des propriétés immatérielles. La composante immatérielle de la tâche correspond aux objectifs que doit atteindre le système de travail, alors que sa composante matérielle est le procédé de fabrication, la pièce, les outils et la documentation par exemple. L’opérateur possède des capacités physiques (avec son corps) et des capacités cognitives. Le système robot comprend lui aussi des éléments matériels et immatériels. La partie matérielle englobe la structure mécanique du robot, les éventuels axes supplémentaires, la ou les baies de commande, les capteurs, les effecteurs, les interfaces physiques, et autres composants nécessaires à l’exécution de la tâche. Ces éléments forment la structure (électromécanique) du système robot. La partie immatérielle concerne l’ensemble de l’architecture logicielle, les programmes, les données et les communications, que ce soit pour le traitement des données capteurs, les asservissements du robot ou des axes, les programmes du robot, la commande des effecteurs, l’affichage des données sur les interfaces, l’envoi de commande depuis les interfaces, ou pour tout autres échanges et traitements d’informations. Ces éléments déterminent le fonctionnement du système robot.

Les propriétés matérielles et immatérielles ne sont pas indépendantes. En effet, pour la tâche, l’objectif définit le procédé et le procédé définit l’objectif⁴⁰ ; pour le système robot, la structure matérielle dépend du fonctionnement que l’on veut obtenir et le contrôle, par exemple, dépend des technologies utilisées ; enfin, pour l’opérateur, le corps et la cognition sont interdépendants dans ce qui est appelé la cognition incarnée dans la thèse de Moulières-Seban [MS17]. Le système cobotique complété avec ses propriétés matérielles et immatérielles est illustré sur la figure 2.16.

40. Par exemple en changeant de procédé, on peut se fixer des objectifs différents en terme de qualité ou de productivité.

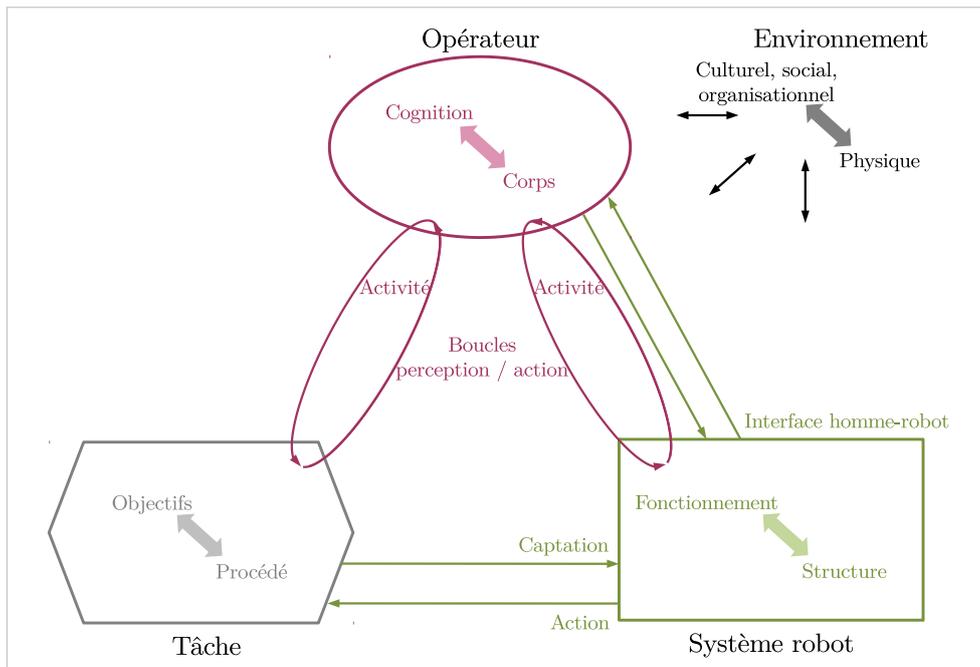


Figure 2.16 – Représentation des propriétés matérielles et immatérielles du système cobotique. Pour chaque élément, elles sont représentées de part et d’autres d’une flèche bilatérale.

Ces différents éléments sont autant de déterminants à intégrer pour la conception du système cobotique. Ils influencent l’activité de travail de l’opérateur qui émerge de sa collaboration avec le robot.

À partir de ce modèle et de classifications existantes, Théo Moulières-Seban et moi-même avons dressé une typologie des systèmes cobotiques, que nous synthétisons sur la figure 2.17 : téléopération, colocalisation collaborative, comanipulation et exomanipulation [MS17].

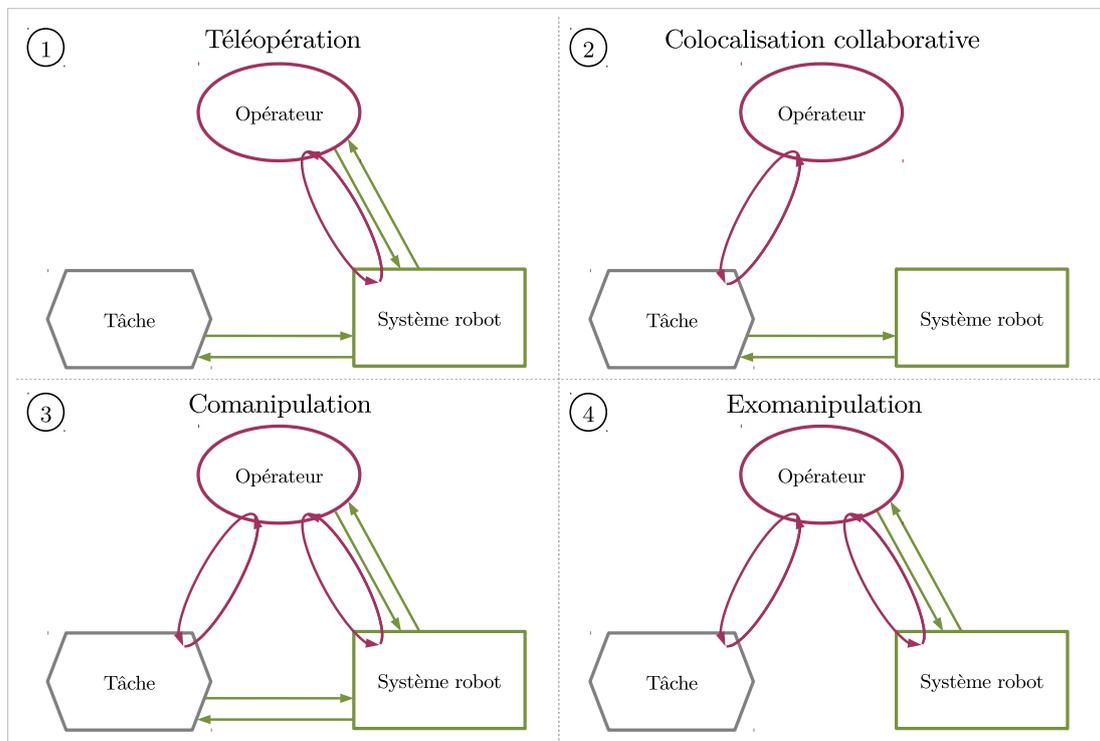


Figure 2.17 – Typologie des systèmes cobotiques : téléopération, colocalisation collaborative, comanipulation et exomanipulation. Les différents types sont ordonnés de 1 à 4 selon une proximité homme-robot croissante.

Dans un système cobotique de type "téléopération"⁴¹, l'opérateur est situé à distance de l'environnement de la tâche et il réalise son activité de travail à travers le système robot. Sur le modèle (1), le système cobotique est ainsi représenté sans lien direct entre l'opérateur et la tâche. Le système robot couvre les différents composants répartis entre l'environnement de l'opérateur (dispositifs de commandes, interface de supervision, etc.) et celui de la tâche (robot manipulateur, capteurs, effecteurs, par exemple). Des exemples de systèmes cobotiques de ce type sont :

- un robot présent dans un environnement hostile qui est piloté à distance par un opérateur pour réaliser une tâche en toute sécurité⁴² ;
- un chirurgien qui effectue une opération chirurgicale avec un robot médical⁴³ pour plus de précision ;
- une personne qui supervise des opérations réalisées par un robot à distance⁴⁴.

Nous désignons par "colocalisation collaborative", un type de système cobotique au sein duquel l'homme et le système robot partagent un environnement de travail commun et collaborent pour réaliser une tâche, sans interaction physique entre eux. Sur le modèle (2), nous représentons le système cobotique sans lien direct entre l'opérateur et le système robot, pour exprimer que cette interaction est plus faible par rapport aux autres types de systèmes cobotiques. Cela ne signifie cependant pas l'absence d'interactions homme-robot ; celles-ci peuvent avoir lieu par intermittence ou à haut niveau. Des exemples de systèmes cobotiques de ce type sont :

- un robot manipulateur qui tient une pièce et la présente dans différentes positions à l'opérateur, pendant que ce dernier réalise des opérations sur la pièce ;
- un opérateur qui dispose un colis sur un robot mobile qui va le livrer.

Dans un système cobotique de type "comanipulation", l'opérateur et le robot manipulent conjointement une pièce ou un outil pour réaliser une tâche. Le modèle (3) ne présente pas de différence avec le modèle générique puisque les interactions entre l'opérateur, le robot et la tâche sont d'importance égale. Des exemples de systèmes cobotiques de ce type sont :

- un cobot qui guide les gestes de l'opérateur pour effectuer une opération d'assemblage avec précision ;
- un opérateur qui utilise un "robot collaboratif" pour manutentionner une pièce lourde, le poids et l'inertie de la pièce étant compensés par le robot ;
- un outil lourd dont le poids est compensé par un cobot pour que l'opérateur puisse se concentrer sur la réalisation des opérations sans effort.

Enfin, nous qualifions d'"exomanipulation" un type de système cobotique dans lequel l'opérateur "revêt" un exosquelette⁴⁵ pour augmenter ses capacités ou diminuer sa fatigue dans la réalisation d'une tâche. Dans ce cas, comme illustré sur le modèle (4), il n'y a pas de lien direct entre le système robot et la tâche ; seul l'opérateur interagit directement avec la tâche, en étant aidé par l'exosquelette. Des exemples de systèmes cobotiques de ce type sont :

- un opérateur qui revêt un exosquelette pour déplacer des charges à travers un atelier avec moins d'effort ;
- un fantassin équipé d'un exosquelette pour le soulager de la charge portée et lui permettre de parcourir une plus grande distance en réduisant sa fatigue.

41. Nous utilisons ici le terme de téléopération au sens large, en incluant le contrôle supervisé (aussi appelé supervision par abus de langage [GRMA10]).

42. Par exemple pour la maintenance d'un réacteur nucléaire [GMG⁺10].

43. Tel que le robot da Vinci de la société Intuitive Surgical https://www.intuitivesurgical.com/products/davinci_surgical_system/.

44. Tel que le robot d'exploration Curiosity, de la NASA, sur Mars.

45. Dans cette thèse, seuls les exosquelettes actifs programmables, qui sont des robots, sont considérés. Une description plus détaillée des exosquelettes est fournie dans la thèse de Moulières-Seban [MS17]. Il y a plusieurs limites à leur déploiement dans l'industrie à l'heure actuelle. Un des principaux frein est la méconnaissance des effets à long terme du port d'exosquelettes sur la santé des opérateurs. Par exemple un exosquelette qui n'est lié qu'aux membres supérieurs d'une personne peut avoir des effets négatifs en reportant les charges soulevées sur les articulations des membres inférieurs. Dans cette thèse, les systèmes cobotiques de types exomanipulation n'ont donc pas fait l'objet de développements.

Ces quatre types de systèmes cobotiques sont présentés selon une proximité croissante entre l'homme et le robot. En effet, en téléopération l'homme et le robot sont dans des environnements distincts, en colocalisation collaborative ils partagent l'environnement de travail mais ont peu d'interaction physique, en comanipulation l'interaction physique est continue, et en exomanipulation l'homme et le robot sont liés et interagissent à travers plusieurs zones de contact réparties sur le corps humain.

Bien que ces types soient clairement distincts, il est tout à fait possible pour la réalisation d'une tâche que le système cobotique change de forme, passant, par exemple, de la colocalisation collaborative à de la comanipulation.

2.3 Conception d'un système cobotique pour l'industrie

Ayant introduit et défini les systèmes cobotiques dans les sections précédentes, nous allons maintenant nous intéresser à leur conception. Pour cela, nous nous appuyons d'abord sur les approches classiques de conception d'une installation robotisée dans l'industrie (voir section 2.3.1). Ces approches étant limitées pour développer une activité de collaboration homme-robot, nous nous appuyons également sur les approches de conception issues de l'ergonomie pour y intégrer les opérateurs (voir section 2.3.3). Sur ces bases, nous proposons une approche pour la conception d'un système cobotique pour l'industrie (voir section 2.3.4).

2.3.1 Approche classique de conception d'une installation robotisée

2.3.1.1 Démarche d'un projet d'installation robotisée

Pour formaliser une démarche de projet de conception d'un système cobotique, nous nous intéressons d'abord aux conduites de projet mises en œuvre en général dans l'industrie pour concevoir une installation robotisée.

Dans son guide de robotisation à destination des industriels, le Syndicat des entreprises et technologies de production (Symop), donne quatre étapes principales qui composent un projet de robotisation : l'avant-projet, le projet, la formation et le bilan [Sym11]. L'avant-projet sert à définir le besoin et évaluer la rentabilité du projet. Le projet comprend la réalisation des études, des développements et des essais chez l'intégrateur, et la mise en route chez l'industriel utilisateur. En parallèle des phases finales du projet, l'intégrateur assure la formation du personnel (programmation, production et maintenance). À la fin du projet et dans les mois qui suivent le début de l'exploitation de l'installation robotisée, le bilan permet d'analyser et de faire le point sur le déroulement du projet, et sur le fonctionnement de l'installation. Cette démarche de projet est détaillée dans le tableau 2.2.

Avant-projet	<ul style="list-style-type: none"> — Définition des objectifs — Élaboration du cahier des charges — Recherche et validation des solutions — Évaluation de la rentabilité — Choix du partenaire (intégrateur ou constructeur de robots)
Projet	<ul style="list-style-type: none"> — Nomination d'un chef de projet — Réalisation des études par l'intégrateur — → Validation des études par l'utilisateur — Approvisionnement — Installation, programmation, mise en route chez intégrateur et test — → Réception provisoire — Formation des personnes à la programmation robot — Mise en route chez l'utilisateur — Formation à la conduite de l'installation — → Réception définitive — Formation du personnel de maintenance au maintien de l'installation
Bilan projet	<ul style="list-style-type: none"> — Évaluation du projet (atteintes des objectifs, raison des écarts) — Capitalisation du savoir-faire (technique, de gestion et d'organisation) — Considération des prochains projets robotiques
Note : → correspond aux jalons du projet.	

Tableau 2.2 – Démarche de projet de robotisation, d'après le Symop [Sym11].

Cette conduite de projet présentée par le Symop est en réalité une démarche classique dans les projets industriels et contient peu de spécificités liées à la robotique. Au sein de cette conduite de projet, nous notons que les phases suivantes sont celles qui peuvent contenir des éléments spécifiques à la robotique :

- l'élaboration du cahier des charges ;
- la recherche des solutions ;
- le choix du partenaire ;
- la conception du système robot.

En effet, dans le cahier des charges, certains éléments doivent être inclus pour spécifier le besoin fonctionnel auquel devra répondre le système robot : procédé à réaliser, volume de production, temps de cycle, poids des pièces à traiter, dimension de l'espace de travail, environnement dans lequel le robot doit évoluer (température, humidité, atmosphère sensible), par exemple. Ces éléments doivent rendre compte des caractéristiques des systèmes robots et de leur conception, qui sont décrits par la suite.

La recherche des solutions doit permettre d'orienter le choix d'un robot, son implantation et les temps de cycle. Pour cela, des simulations robotiques numériques peuvent servir de support. En parallèle, des essais de faisabilité proches des conditions réelles peuvent être menés pour évaluer si les opérations les plus complexes peuvent être réalisées avec un robot. Ces choix de conception préliminaires découlent sur la phase de conception du système robot, qui est présentée à la section 2.3.1.3.

En fonction de ses compétences internes, un industriel peut s'orienter vers un partenaire intégrateur ou directement vers un constructeur de robots pour la conduite du projet et la réalisation des développements. Nous décrivons les rôles des acteurs du projet dans la section suivante.

2.3.1.2 Acteurs et rôles dans un projet de conception robotique

Les acteurs principaux d'un projet de conception robotique sont :

- les industriels chez qui le besoin est présent et pour qui l'installation doit être conçue ;
- les intégrateurs qui sont des entités externes ayant la capacité de concevoir et d'intégrer des installations robotisées ;
- et les constructeurs de robots qui conçoivent, fabriquent et vendent les robots industriels pouvant être utilisés dans une installation robotisée.

Les rôles principaux, nécessaires dans tout projet de conception, sont ceux de maîtrise d'ouvrage et de maîtrise d'œuvre. Dans un projet de conception robotique, la maîtrise d'ouvrage correspond à l'industriel qui porte le besoin de concevoir ou transformer un poste de travail avec un système robot. La maîtrise d'œuvre est l'entité qui va concevoir l'installation robotisée en suivant le cahier des charges de la maîtrise d'ouvrage. Différents acteurs peuvent occuper le rôle de maîtrise d'œuvre, en fonction de la politique de l'industriel porteur du besoin. Ce rôle peut être pris par l'industriel lui-même, par un intégrateur externe ou partagé selon les phases du projet. Un troisième rôle pouvant intervenir dans le projet, est celui de support au développement de l'installation robotisée. C'est un rôle que peuvent occuper les constructeurs de robots industriels en donnant des orientations pour le choix d'un robot approprié au besoin et en fournissant le logiciel de programmation hors-ligne de ses robots.

On retrouve plusieurs approches adoptées par les industriels pour la robotisation de leurs installations, en fonction de leurs besoins et leurs compétences internes :

- (1) L'industriel sous-traite l'ensemble de l'intégration et de la programmation des composants robotiques pour l'application.
- (2) L'industriel passe par un intégrateur pour concevoir et intégrer les composants dans la cellule, mais il réalise la programmation des robots lui-même.
- (3) L'industriel intègre lui-même l'ensemble de la cellule sans passer par un intégrateur.

Les rôles que peuvent prendre l'industriel, l'intégrateur et le constructeur de robots, en fonction de ces différents cas de figure, sont résumés dans le tableau 2.3.

	Rôles de l'industriel	Rôles de l'intégrateur	Rôles du constructeur
(1)	Consulte des intégrateurs en spécifiant son besoin, puis, suit le projet en s'assurant de la conformité de la réponse apportée.	Choisit le ou les modèles de robot adaptés à l'application, prend en charge l'ensemble de l'intégration des composants de la cellule et de la programmation des robots.	Transparent pour l'industriel.
(2)	Consulte et suit des intégrateurs pour l'intégration des différents composants nécessaires à l'application (robots, effecteurs, etc.), puis, réalise lui-même la programmation des robots.	Choisit et intègre les composants robotiques adaptés à l'application.	Peut fournir le logiciel pour la programmation hors-ligne de ses robots.
(3)	Choisit et intègre les robots et autres composants nécessaires à son application et effectue leur programmation.	Aucun.	Peut éventuellement guider l'industriel dans le choix de robots adaptés et fournir un logiciel de programmation hors-ligne.

Tableau 2.3 – Répartition des rôles entre l'industriel, l'intégrateur et le constructeur de robots en fonction de l'approche de robotisation adoptée par l'industriel.

L'approche (1) est celle adoptée par les industriels qui n'ont pas, ou peu, de compétence en robotique ou qui ne sont pas équipés pour programmer leurs robots⁴⁶. C'est un cas répandu dans différentes sociétés de Safran et chez ArianeGroup.

⁴⁶. Étant donné le coût annuel des licences des logiciels de programmation hors-ligne fournies par les constructeurs de robots et le temps de formation nécessaire pour les utiliser, il est plus intéressant de les utiliser pour un industriel qui installe plusieurs robots par an sur ses postes.

L'approche (2) est plus généralement adoptée par les industriels qui ont des roboticiens ayant été formés à la programmation des robots industriels. C'est un cas également répandu dans les différentes sociétés de Safran.

L'approche (3) est adoptée lorsque l'industriel a les compétences et la volonté de maîtriser l'ensemble de l'installation de ses moyens robotiques. C'est un cas moins répandu, mais que l'on retrouve tout de même dans certaines sociétés de Safran.

Les échanges que nous avons eus avec des représentants de différentes industries montrent que l'approche (1) tend à se répandre plus que les autres. Certaines entreprises, notamment dans l'automobile, qui avaient un grand nombre de compétences en interne sur la robotique, ne remplacent pas les départs de roboticien pour aller vers la sous-traitance de cette compétence, ceci dans le but de réduire les coûts de la masse salariale et de gagner en flexibilité. Ce phénomène s'inscrit dans une tendance globale qu'ont les grandes sociétés à se tourner vers la sous-traitance des compétences techniques pour gagner en flexibilité. Le revers de la médaille de cette stratégie est la perte de savoir-faire qui pouvaient être propres à ces industries.

Suivant leur politique vis-à-vis de la robotisation de leurs installations, les industriels peuvent privilégier l'utilisation de robots d'un constructeur particulier (mono-marque) ou de plusieurs constructeurs (multi-marque). Ces politiques mono-fournisseur ou multi-fournisseurs sont génériques parmi les différentes industries, mais elles possèdent des spécificités liés à la robotique. Dans le cadre de projets robotiques, la politique mono-marque peut être liée à un attachement historique à un constructeur de robots et peut permettre de réduire les coûts des approches (2) et (3). Investir dans un logiciel de programmation dédié à une marque de robot, est bien moins coûteux annuellement que ceux permettant la programmation de robots de plusieurs marques. Cependant, les industriels mono-marque sont limités par les gammes de robots proposées par le constructeur auquel ils sont attachés. Or, certains constructeurs possèdent des gammes de robots spécialisés pour certaines applications, que ne proposent pas leurs concurrents. La robotisation d'un nouveau type de procédé, pour lequel ne sont pas conçus les robots du constructeur privilégié, peut alors contraindre l'industriel à faire le choix entre :

- Prendre un robot du constructeur et l'adapter au procédé – lorsque c'est possible – même s'il n'est pas le plus performant sur le marché pour cette application.
- Recourir à l'approche (1) en s'ouvrant à d'autres marques de robots.
- Revoir sa politique, investir dans de nouveaux outils et se former à la programmation voire à l'intégration d'autres marques de robots.

2.3.1.3 Conception, choix et intégration des systèmes robots

Les robots industriels sont conçus de manière à être polyvalents pour pouvoir être utilisés sur des applications dont les besoins varient. Diverses caractéristiques distinguent les différents modèles de robots industriels telles que la charge utile, l'enveloppe de travail, les degrés de liberté et les contraintes environnementales qu'ils peuvent supporter (ATEX, salle blanche, température élevée ou milieu humide, par exemple). Les critères d'optimisation des robots sont la performance dynamique (vitesse, accélération, inertie), la précision, la répétabilité et la durée de vie [SM08].

Le rôle des concepteurs d'installations robotisées (intégrateurs spécialisés ou roboticiens internes à l'entreprise) est alors de choisir le ou les robots appropriés pour l'application visée, et de concevoir les autres composants (capteurs, effecteurs et autres équipements) formant le système robot. Ils devront ensuite installer, programmer et mettre en route l'ensemble des composants de la cellule industrielle robotisée, en respectant les réglementations en vigueur pour la sécurité. Les concepteurs d'installations robotisées s'appuient sur leur connaissance et leur expérience pour choisir les robots adaptés aux besoins industriels. Les constructeurs de robots peuvent fournir un support à ce choix. Par exemple, Fanuc⁴⁷ liste les critères suivants pour la sélection d'un robot industriel :

47. <http://www.roboticsupdate.com/2016/08/fanuc-selecting-the-right-robot-arm-for-the-job/>

- Le temps de cycle : qui est plus adapté que la vitesse car il prend en compte l'accélération du robot.
- La capacité de charge utile : qui doit prendre en compte la masse de l'effecteur et d'éventuelles futures évolutions du besoin.
- Le coût du robot et le ROI⁴⁸ : qui dépendent des spécifications techniques et des besoins en sécurité, qualité, temps de cycle, santé et volume de production.
- La portée : qui donne l'enveloppe de travail du robot.
- Le nombre d'axes : qui influence le nombre de degrés de liberté dans l'espace opérationnel.

Adapter l'environnement de travail, pour réduire la portée, peut être un levier pour augmenter la productivité, et réduire la taille et le coût du robot. Le choix du nombre d'axes doit non seulement être guidé par le nombre de degrés de liberté nécessaires pour réaliser le procédé, mais également s'il y a un besoin de flexibilité, par exemple pour éviter des obstacles. La redondance donnée par les degrés de liberté supplémentaires peut en effet permettre de suivre des trajectoires d'outils tout en ayant de la flexibilité sur les postures prises par le robot, pour les adapter à l'espace de travail. En plus du choix des robots et des équipements appropriés, la robotisation d'une application passe par l'optimisation du positionnement du robot dans le poste, de ses trajectoires et de ses postures. Ces développements visent à répondre au temps de cycle cible, au besoin d'éviter des obstacles, et aux contraintes du procédé et de l'effecteur (masse, encombrement, paramètres procédés et rayon de courbure des câbles de l'effecteur).

Enfin, la mise en œuvre du poste robotisé nécessite d'intégrer l'ensemble des composants pour former le système robot et l'adapter à l'application. Hägele et ses collaborateurs listent les niveaux d'intégration système, généralement effectués dans l'ordre suivant : physique, communication, configuration, application et tâche [HNP08]. Ces niveaux sont détaillés dans le tableau 2.4. Ces étapes d'ingénierie peuvent représenter la moitié du coût d'une installation robotisée.

Physique	Sélection des équipements suivant leur dimensionnement mécanique (taille, charge, contrainte) Création des interfaces mécaniques Alimentations électriques (pour robots, effecteurs et autres équipements) Connexions pour les signaux analogiques
Communication	Interconnexions pour les entrées/sorties binaires Communication des données (octets, latences, débits) Transfert des séquences de données
Configuration	Configuration des messages entre les appareils devant communiquer Établissement des services Réglages pour la performance et l'utilisation des ressources
Application	Définition des fonctions et services au niveau applicatif
Tâche	Programmation de l'application, en utilisant les services définis

Tableau 2.4 – Les niveaux d'intégration d'un système robot industriel, généralement réalisés dans l'ordre listé, traduit de Hägele et ses collaborateurs [HNP08].

2.3.1.4 Cas particulier des robots collaboratifs

La collaboration des robots avec les hommes dans l'industrie amène de nouveaux enjeux pour la conception et l'introduction des systèmes robots sur les postes de travail. L'homme ne doit pas seulement venir en support des opérations que le robot ne peut pas réaliser, son rôle sur le poste de travail doit être pensé pour être adapté aux besoins des opérateurs qui vont collaborer avec le robot. De l'autre côté, la présence de l'homme ouvre des opportunités pour réduire la complexité du développement du système robot, en s'appuyant sur la compréhension humaine de l'environnement, sur sa régulation des variabilités et sur ses connaissances métier. Les approches de projet robotique

48. Retour sur investissement (Return On Investment – ROI).

que nous avons vues précédemment nécessitent des adaptations pour intégrer dès la conception ces nouveaux enjeux de l'implication de l'homme.

L'arrivée des "robots collaboratifs" a sensibilisé les industriels aux possibilités de cette collaboration pour réaliser des tâches de production. Sur le plan international, ces nouveaux moyens ont conduit à des réflexions pour autoriser une proximité entre homme et robot dans l'industrie, allant jusqu'aux interactions physiques. La sécurité et la fiabilité des robots, et de leurs interactions physiques avec les hommes a été l'objet d'études significatives depuis de nombreuses années dans la recherche [AASB⁺06] [Had14] [MPD⁺16]. Sur la base des travaux existants, ces nouvelles réflexions en contexte industriel ont mené à la mise à jour, en 2011, des normes ISO 10218-1 et 10218-2 sur la sécurité des robots, des systèmes robots et de leur intégration. Elles ont abouti, en 2016, à la spécification technique ISO/TS 15066, pour guider l'introduction des "robots collaboratifs", du point de vue de la sécurité.

En France, le Centre technique des industries mécaniques (Cetim) accompagne les industriels dans l'introduction des "robot collaboratif". Il a rédigé, en 2013, un guide à destination des entreprises [Aco13] pour, d'une part, faciliter l'appropriation des normes, et d'autre part, proposer une démarche pour intégrer la sécurité dans la mise en œuvre d'applications collaboratives⁴⁹. Ils préconisent une démarche s'appuyant sur l'analyse des risques tout au long du projet. Ils recommandent d'analyser l'activité des opérateurs, mais seulement pour identifier de potentiels scénarios à risque.

Des travaux récents ont tout de même été conduits pour prendre en compte certains aspects humains. Weistroffer et ses collaborateurs ont étudié l'acceptabilité de la collaboration homme-robot [WPF⁺14]. Ils ont montré que les simulations en réalité virtuelle pouvaient permettre d'anticiper l'acceptation de la collaboration homme-robot par des opérateurs en situation réelle. Ces études sont limitées à la collaboration dans un environnement partagé par l'homme et le robot.

Maurice et ses collaborateurs ont développé un outil pour réaliser une évaluation "ergonomique" des activités de comanipulation avec un robot collaboratif [MPMB17]. Cet outil intègre des indicateurs sur les efforts et postures de l'opérateur qui sont évalués dynamiquement durant l'activité. Ces indicateurs sont évalués en simulation à l'aide d'un mannequin virtuel dont les mouvements répliquent ceux de l'opérateur. L'outil offre un support pour optimiser la conception d'un robot collaboratif en simulation numérique, en fonction de l'activité de comanipulation à réaliser. Cependant, dans ces travaux, l'évaluation "ergonomique" est seulement effectuée d'un point de vue biomécanique et l'outil n'est pas adapté à l'évaluation de modes de collaboration différents de la comanipulation.

2.3.2 Limites des approches de conception centrées sur le système robot

Les approches de conception, pour la robotisation des applications industrielles, s'appuient sur une forte expertise technique dans le développement des systèmes robots. Le besoin industriel est généralement intégré à travers le cahier des charges et les échanges, au cours du projet, entre la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre. Dans la conduite de projets, l'ensemble des acteurs est particulièrement attentif à la sécurité de l'installation et au respect des normes. On retrouve actuellement ces mêmes caractéristiques dans le développement et le déploiement des "robots collaboratifs".

Cependant, ce socle acquis de pratiques pour la conception d'installations robotisées, ne comporte pas de méthode pour développer l'activité de l'homme, qui sera amené à collaborer avec un robot pour réaliser des tâches industrielles. Les opérateurs du poste de travail robotisé ne sont généralement inclus qu'à la fin du projet, pour leur formation. Ils sont parfois consultés au début du projet, en général pour recueillir sommairement les caractéristiques de la tâche actuelle qui ont un impact sur le dimensionnement technique du robot (par exemple, le volume de l'espace de travail, les contraintes de l'environnement, les cadences, les outils, les masses des pièces). Les caractéristiques et les besoins des opérateurs (déterminants, marge de manœuvre pour réguler les situations de variabilités), ne sont donc pas inclus dans la définition du besoin industriel, exprimé dans le cahier des charges.

49. Le terme est ici utilisé pour qualifier des applications dans lesquelles des "robots collaboratifs" sont utilisés.

Les risques d'une faible intégration des opérateurs et de leur travail ont été présentés précédemment (cf. section 2.1.4.2). Ils comprennent une charge de travail supplémentaire non anticipée, du stress, des risques d'incident et une baisse de la productivité. Ces risques sont exacerbés pour la collaboration homme-robot puisque l'activité de l'homme est étroitement liée à l'activité du robot et inversement. De plus le travail de l'homme est transformé par l'introduction du partenaire robot, qui amène de nouveaux déterminants. Ces derniers sont de nouvelles sources de variabilités que l'homme devra réguler. Cette sous-estimation de la transformation du travail humain et des variabilités est au cœur des problèmes récurrents de l'automatisation [LS09]. Lee et Seppelt préconisent d'adopter une approche de conception s'intéressant conjointement aux rôles de l'homme et du robot dans la réalisation de la tâche, en laissant à l'opérateur une marge de manœuvre suffisante pour compenser les limites des robots, et en facilitant l'exploitation des capacités des robots.

2.3.3 Intégration des opérateurs dans la conception

Pour intégrer les opérateurs dans la conception, nous nous appuyons sur l'approche de conception en ergonomie que nous détaillons dans la section 2.3.3.1. Les concepts clés de l'ergonomie ont été formalisés et rattachés aux phases d'un projet industriel dans la "conduite de projet en ergonomie" de Safran, décrite dans la section 2.3.3.2.

2.3.3.1 L'approche de conception en ergonomie

L'ergonomie s'intéresse aux différentes dimensions de l'homme au travail : psycho-physiologique, physique, sociale, organisationnelle et économique [Wil14]. L'étude du travail de l'homme vise à améliorer, à la fois, la performance pour l'entreprise, et la santé de l'homme dans les systèmes de production.

Barcellini et ses collaborateurs soulignent que les défaillances souvent rencontrées dans la conduite des projets de conception sont liées à la structure du projet, ou à l'insuffisante prise en compte du travail humain et des régulations mises en œuvre par les opérateurs pour faire face aux variabilités [BVD14]. Les défaillances liées à la structure du projet incluent la faiblesse du pilotage, la faiblesse de la présence de responsables d'exploitation, la sous-estimation des dimensions liées aux caractéristiques de la population de travail comparée à l'importance accordée aux dimensions techniques, l'absence d'interactions entre définition et recherche de solution, la mauvaise information/consultation des instances représentatives du personnel, et la découverte tardive du projet par les opérateurs.

La compréhension de l'homme au travail est un facteur crucial pour la collaboration homme-robot. Hoc précise que pour élaborer cette collaboration, il est d'abord nécessaire d'avoir une coopération concepteur-opérateur [Hoc01] .

Ainsi, pour intégrer les opérateurs dans la conception, l'approche doit s'appuyer sur une analyse du projet et des activités de travail, la mise en place d'une démarche structurée participative et concertée (impliquant les décideurs, les opérateurs, les concepteurs et les instances représentatives du personnel), la conduite de simulations du travail, la formalisation des résultats des simulations et l'accompagnement du projet [BVD14].

Les deux éléments méthodologiques clés de l'ergonomie, pour intégrer les activités de travail actuelles et futures des opérateurs dans la conception d'un système cobotique, sont l'analyse préliminaire et les simulations participatives⁵⁰.

L'analyse préliminaire comprend l'analyse du travail prescrit (à travers l'analyse de la tâche et des instructions de travail, par exemple), et permet de dégager le travail réel en s'appuyant sur une

50. Les simulations participatives sont des simulations faisant intervenir les opérateurs dans l'étude d'un système modélisé. Les opérateurs participant aux simulations peuvent ainsi donner leur avis sur la conception, et l'alimenter avec leur expertise et leurs besoins réels au poste de travail.

analyse poussée de l'activité des opérateurs. Les intérêts de cette analyse pour la conception des systèmes cobotiques sont :

- l'intégration des déterminants, des variabilités inter- et intra-opérateur, et des situations de travail actuelles, qui auront un impact sur la structure et le fonctionnement du système cobotique ;
- la mise en valeur de l'expertise des opérateurs, et de leurs régulations face aux variabilités et aux conséquences de leur activité, pour concevoir un système cobotique laissant suffisamment de marge de manœuvre aux opérateurs (cf. section 2.1.4.3).

En complément de l'activité sur le poste visé par le projet de conception, d'autres situations de référence peuvent être analysées, lorsqu'elles présentent un intérêt pour la conception [Dan04]. Par exemple, l'analyse d'un système de travail qui présente des caractéristiques techniques ou organisationnelles similaires au futur système, permet d'obtenir des variabilités liées à la technologie ou aux formes organisationnelles retenues. Différents outils méthodologiques complémentaires permettent d'analyser l'activité des opérateurs [MS17] :

- les observations : pour récolter le travail des opérateurs en situation ;
- les interviews : pour questionner les opérateurs sur des situations difficiles à observer ;
- les débriefings : pour valider et enrichir avec les opérateurs les résultats de l'analyse.

Les simulations participatives permettent de faire le lien entre l'analyse préliminaire et la conception du futur système de production [Thi98]. Dans un projet de conception, il est impossible de prévoir en détail l'utilisation qu'un opérateur fera du futur système. En revanche, les choix de conception déterminent les possibilités et impossibilités de l'activité future [Dan04]. L'objectif des simulations participatives est d'évaluer les choix (aussi appelés "hypothèses") de conception, et de faire émerger les potentielles activités futures des opérateurs pour les analyser et les développer [Dan07]. Les hypothèses de conception doivent être testées sur les situations de travail en mode de fonctionnement nominal, mais aussi sur les modes transitoires (nettoyages annexes, maintenances, par exemple) et les cas dégradés (manque de matériel, matériel défectueux, par exemple) [Thi98]. La mise en situation des opérateurs lors de ces simulations, permet d'intégrer les besoins et contraintes opérationnelles (dont les opérateurs ont la connaissance), et de vérifier que la conception ne s'en éloigne pas.

Dans le cadre de la conception d'un système cobotique, les hypothèses portent à la fois sur le système robot (sa structure, son fonctionnement), et sur les rôles de l'homme et du robot dans la réalisation de la tâche en collaboration. En plus d'évaluer les hypothèses de conception, les simulations participatives sont l'opportunité d'étudier les transformations introduites par le système conçu (nouveaux déterminants, nouvelles situations de travail, activité issue de la collaboration homme-robot), et de vérifier que l'opérateur a une marge de manœuvre suffisante pour réguler les variabilités des situations réelles.

Les simulations sont construites au travers des scénarios et des outils de simulation [Thi17]. Un scénario est défini comme « la description narrative d'un enchaînement d'actions ou de séquences d'actions d'un individu ou d'un collectif d'individus en situation de travail » [Mal94]. En fonction des hypothèses à tester et des futures situations de travail projetées, le scénario va proposer des possibilités de fonctionnement de l'homme au travail. Thibault [Thi17] détaille deux catégories principales d'outils de simulation : le prototypage et les simulations numériques.

Le prototypage consiste à représenter, à l'échelle 1 ou à échelle réduite, les pièces, outils, équipements, voire poste de travail futurs des opérateurs. Ils peuvent ainsi interagir directement avec ces modèles tangibles pour simuler les futures situations de travail. Les maquettes (ou modèles) peuvent être réalisées en carton, en tube, en bois, en polystyrène ou en impression 3D, par exemple. Les simulations numériques permettent de concevoir et simuler des interfaces homme-machine, les flux d'un système de travail, ou encore le fonctionnement d'une installation (que ce soit avec des simulations 3D sur ordinateur ou en réalité virtuelle).

Thibault synthétise ces outils de simulation en trois grandes familles : maquettage physique, maquettage numérique 3D et maquettage en réalité virtuelle. Il en résume les avantages et inconvénients dans le tableau 2.5. Ce tableau donne des orientations pour le choix d'un type d'outil de simulation

en fonction des besoins et du contexte du projet.

	Maquettage physique	Maquettage numérique 3D	Maquettage en réalité virtuelle
Avantages	Rapidité de mise en œuvre Coût faible Essais en situation réelle avec les parties prenantes Niveau d'immersion maximum	Facilité d'intégration dans le processus de conception Rapidité de mise en œuvre à partir de fichiers de CAO Rapidité d'évolution (mise à jour)	Mise en situation avec des moyens détaillés Possibilités d'immersion et d'interactivité Visite virtuelle des futures installations
Inconvénients	Prendre le temps de construire et "faire vivre" la maquette physique Lieu pour accueillir la maquette	Besoin de compétences spécifiques CAO Programmation du modèle de l'activité de l'opérateur Coût des licences Niveau d'immersion faible voire nul	Besoin de compétences spécifiques de haut niveau Temps de mise en œuvre Technologies en constante évolution (taux de maturité)

Tableau 2.5 – Avantages et inconvénients des différentes familles d'outils de simulation [Thi17].

Moulières-Seban [MS17] liste un outil de simulation supplémentaire : le "story telling" (simulation langagière). La simulation repose alors fortement sur les scénarios construits, qui sont verbalisés pour mettre l'opérateur en situation.

Thibault [Thi98] répertorie les différentes séries de simulations en fonction de la phase du projet. Les simulations permettent l'intégration des parties prenantes – dont les opérateurs – dans la conception, depuis l'avant-projet jusqu'à la mise en route du système. Les simulations à mettre en œuvre, leur niveau de détail et leur représentativité dépendent de l'étape du projet. La représentativité de la simulation (scénario et modèle) est un paramètre clé, qui doit être adapté aux hypothèses de conception et à la phase du projet. Par exemple, en début de projet, il est risqué de passer du temps à développer un modèle détaillé pour simuler les premières hypothèses de conception émises, alors qu'elles ne sont pas encore fiabilisées. En effet, une simple mise en situation verbalisée avec les opérateurs peut parfois suffire à discréditer une solution envisagée, qui ne répond pas à un besoin non anticipé. À l'opposé une simulation superficielle en fin de projet n'apportera pas d'élément assez précis pour la conception. Ainsi, grâce à l'utilisation de simulations impliquant des opérateurs, et au développement de scénarios et de modèles appropriés, il est possible de détecter, en amont, des problèmes de conception et leurs conséquences sur la santé des opérateurs et sur l'efficacité du système de production [Thi98].

2.3.3.2 La conduite de projet en ergonomie de Safran

Dans nos projets, nous nous appuyons sur la conduite de projet Safran⁵¹. La méthode de gestion de projet adoptée par le groupe Safran est la méthode PROMPT, qui contient 13 jalons (numérotés de S0 à S12). Les jalons S0 à S2 correspondent à la phase de cadrage du projet. Les étapes de conception qui nous intéressent correspondent aux jalons S3 à S8. Les derniers jalons (S9 à S12), correspondent à la phase d'exploitation. Conformément au guide pratique d'ergonomie en conception industrielle de Safran, nous renommons les six jalons de la phase de conception de J1 à J6 [Thi17] :

- (J1) avant-projet : validation du besoin (principes de fabrication, de services, de produits, etc.) ;
- (J2) études de base : validation des cahiers des charges décrivant les principes de solutions ;
- (J3) études de détail : validation des solutions techniques détaillées ;
- (J4) pré-réceptions et réceptions : validation des équipements chez le fournisseur ;

⁵¹. En effet, la partie d'ArianeGroup pour laquelle nous travaillons (Safran Herakles) était, à l'origine, une société de Safran. Les conduites de projet sont ainsi communes.

- (J5) mise en production : validation des préséries ;
 (J6) réceptions définitives : validation de la production série.

Cette méthode de conduite de projet a été complétée avec des jalons et livrables intermédiaires issus de l'ergonomie, pour intégrer le travail des opérateurs dans la conception. La démarche résultante est représentée sur la figure 2.18.

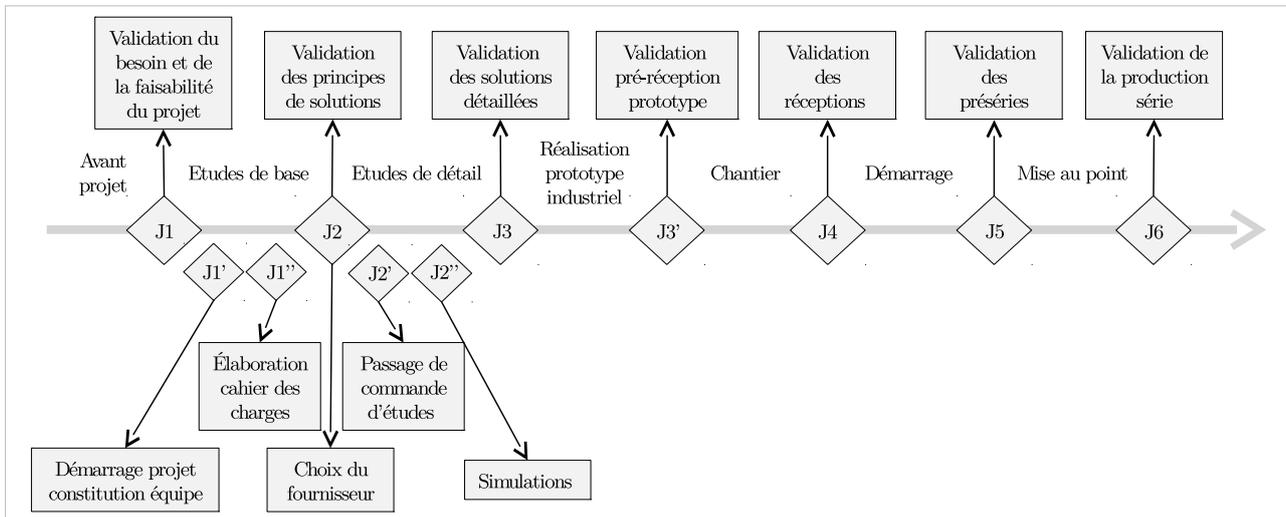


Figure 2.18 – Schéma de la conduite de projet PROMPT Safran Group complétée avec des jalons et livrables intermédiaires d'ergonomie [Thi17].

Chacun des jalons représenté dans le schéma correspond à un livrable en ergonomie. Ils sont listés dans le tableau 2.6.

Jalon de validation		Exemples de livrables en ergonomie
J1	Validation du besoin et de la faisabilité du projet	Retour d'expérience de l'existant (analyse des activités de travail, évaluation des risques existants, données SSE, etc.) mais aussi benchmarking (fournisseurs, autres industriels)
J1'	Démarrage du projet et validation d'une équipe projet	Ressources en ergonomie identifiées et missionnées par rapport à l'équipe projet
J1''	Validation des cahiers des charges et des attendus vis-à-vis des fournisseurs	Préconisations dans les cahiers des charges en termes de spécifications mais aussi d'attendus vis-à-vis des fournisseurs (Simulations, maquettage, obligation de résultats vis-à-vis des risques liés à l'ergonomie, ...)
J2	Validation des principes de solutions	Critères en ergonomie (résultats des simulations, avis des futurs utilisateurs, analyses de situations de référence, etc.) à intégrer dans les critères de choix des fournisseurs
J2'	Validation fournisseurs et lancement des études de détails	Check-list afin de pointer l'ensemble des attendus
J2''	Validation des simulations	Simulations des activités futures, pronostic d'évaluations des risques avec la participation des futurs utilisateurs (production, maintenance, ...)
J3	Validation des solutions détaillées	Check-list et pronostic d'évaluations des risques
J3' et J4	Validation des pré-réceptions et réception	Prototypage/test utilisateurs, pronostic d'évaluations des risques
J5	Validation des pré-séries	Analyse des activités de travail avec les nouvelles installations. Formation et validations des exigences
J6	Validation de la production série	Evaluation définitive des risques et formalisation d'un retour d'expérience (Bonnes Pratiques)

Tableau 2.6 – Les jalons de la conduite de projet PROMPT et les livrables en ergonomie associés [Thi17].

Nous nous appuyerons ainsi sur cette conduite de projet pour intégrer les opérateurs (leur déterminants, leurs besoins, et leur activité) dans la conception.

2.3.4 Proposition d'approche pour la conception d'un système cobotique

La conception d'un système cobotique nécessite le développement conjoint du système robot (structure et fonctionnement), de la tâche (puisque le travail prescrit sera transformé par l'introduction du système robot), et de la nouvelle activité de travail des opérateurs (déterminants, rôles de l'homme et du robot, et marge de manœuvre). Ainsi, l'approche de conception ne peut être le fruit d'un domaine d'expertise unique, puisqu'elle passerait à côté des autres dimensions du système cobotique. D'un côté, une approche centrée sur le développement du système robot risquerait d'aboutir sur un système inadapté aux situations de travail, aux opérateurs et à leurs besoins. D'un autre côté, une approche centrée sur l'homme risquerait d'aboutir sur la conception d'un système peu performant, car ne tirant pas pleinement partie des capacités offertes par les technologies actuelles.

L'approche que nous proposons ici émerge d'un travail interdisciplinaire, mêlant des compétences en robotique, en ergonomie et en cognitive⁵². Cette interdisciplinarité permet d'aborder la cobotique industrielle qui offre des problématiques transdisciplinaires [Cla10], recouvrant les domaines d'étude de l'homme, des robots, de leurs interactions et des systèmes de production industriels. L'aspect interdisciplinaire de notre approche, pour la conception d'un système cobotique, est illustrée sur la figure 2.19.

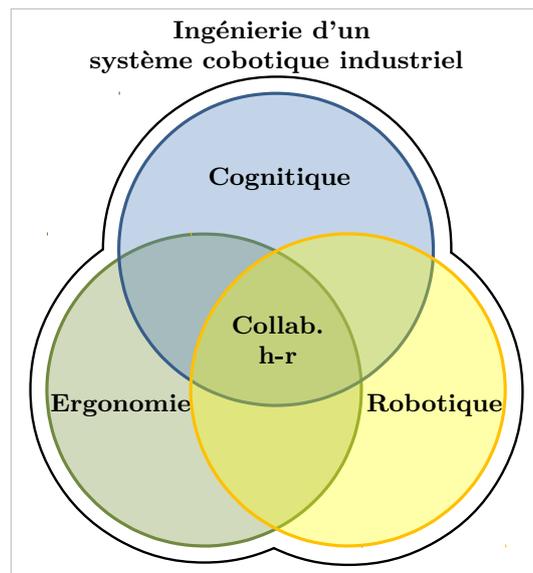


Figure 2.19 – Schéma du caractère interdisciplinaire de la conception en cobotique. La collaboration homme-robot est indiquée par "collab. h-r".

Notre démarche de conception des systèmes cobotiques pour l'industrie repose sur les concepts que nous avons définis précédemment. Pour l'appliquer sur des projets industriels au sein d'ArianeGroup et de Safran, nous nous appuyons sur la conduite de projet en ergonomie de Safran. Les piliers de l'approche sont :

- L'analyse préliminaire : à la fois pour comprendre le travail des opérateurs et pour identifier les solutions potentielles pouvant répondre au besoin réel.
- Des phases itératives d'élaboration des hypothèses de conception et de simulations participatives de ces hypothèses : pour affiner de manière conjointe le système robot, la tâche et la future activité travail homme-robot.

⁵². Dans sa thèse, Moulières-Seban décrit les apports de la cognitive pour l'étude et la formalisation de la connaissance des opérateurs et pour l'analyse des fonctions cognitives homme-robot [MS17]. Ces aspects n'ont pas été développés dans cette thèse.

Nous avons présenté précédemment un modèle de l'homme au travail, montrant la relation entre l'activité, ses déterminants et ses conséquences (cf. section 2.1.4.3). Les déterminants, qui sont les paramètres qui influencent l'activité, peuvent être classés suivant les cinq catégories du diagramme de causes et effets d'Ishikawa (voir figure 2.20) :

- Opérateur : inter-opérateur (force physique, taille, etc.) et intra-opérateur (stress, fatigue, etc.).
- Matériel : outils, outillages, équipements.
- Produits : pièces, matières premières, consommables.
- Méthodes : procédé, procédures, organisation du travail.
- Milieu : lieu de travail, ambiances physiques.

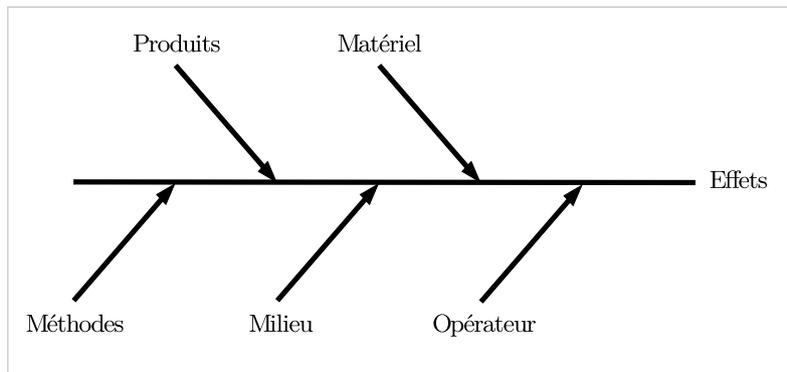


Figure 2.20 – Traduction du diagramme d'Ishikawa [IL90], dont les cinq catégories de causes permettent de classer les déterminants de l'activité de travail des opérateurs.

L'activité des opérateurs consiste à réaliser la tâche prescrite, tout en régulant les variabilités (c'est-à-dire les variations des déterminants) des situations réelles de travail. En fonction des portions (ou sous-tâches) de la tâche à réaliser, des déterminants différents peuvent avoir une influence sur l'activité des opérateurs. Par exemple, la fatigue de l'opérateur aura une influence plus directe sur la réalisation de sous-tâches nécessitant de la concentration ou de la précision. Nous proposons de formaliser l'activité des opérateurs, en la décrivant par sous-tâches, pour y associer les variabilités principales qui influencent chaque portion de l'activité. Ainsi, il est possible de mettre en valeur l'expertise des opérateurs et leurs besoins, qui peuvent varier au cours de l'activité, pour les prendre en compte dans la conception. Cette proposition de formalisation des résultats de l'analyse préliminaire est illustrée sur les deux premières lignes de la figure 2.21.

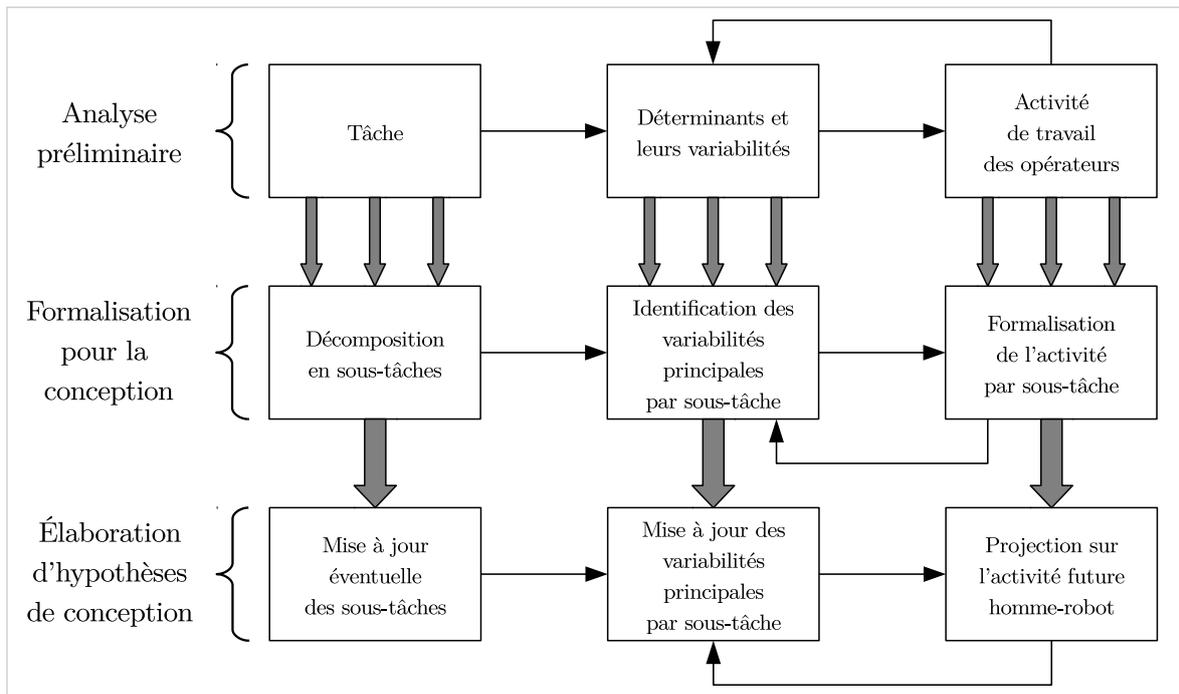


Figure 2.21 – Proposition de formalisation de l'analyse préliminaire pour la conception, suivant une décomposition en sous-tâches.

La formalisation de l'analyse préliminaire fait partie des éléments à intégrer dans l'analyse fonctionnelle. En parallèle, un état de l'art des solutions robotiques pouvant répondre au besoin, est nécessaire pour préparer l'élaboration des hypothèses de conception. Pour concevoir le système cobotique, les hypothèses doivent porter à la fois sur le système robot, sur la tâche et sur le travail de l'homme. Le modèle de système cobotique (cf. section 2.2.4) offre un support pour matérialiser ces hypothèses et considérer l'ensemble des éléments. Le modèle de système robot (cf. section 2.1.3) offre un support supplémentaire pour détailler les hypothèses sur la structure et le fonctionnement du système robot.

Avec l'introduction d'un système robot, l'activité des opérateurs est transformée et de nouveaux déterminants apparaissent. Lors de l'élaboration des hypothèses de conception sur le système cobotique, les nouveaux déterminants liés au système robot peuvent être identifiés. Pour les mettre en valeur, nous proposons de les regrouper sous une nouvelle catégorie "robot", comme illustré sur la figure 2.22.

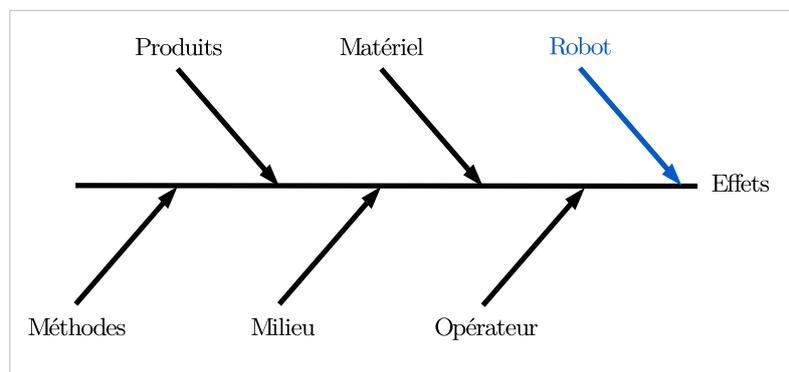


Figure 2.22 – Diagramme d'Ishikawa modifié, avec l'ajout d'une catégorie ("robot", mise en valeur en bleu) pour regrouper les déterminants liés au système robot.

Nous proposons de nous appuyer sur l'activité formalisée par sous-tâche, pour projeter une activité future homme-robot, en mettant à jour les variabilités principales associées. Lorsque le système cobotique conçu amène une modification des sous-tâches, celles-ci doivent être mises à jour. Cette approche pour l'élaboration des hypothèses de conception est illustrée avec la troisième ligne de la figure 2.21.

Les simulations permettent d'évaluer les hypothèses de conception sur le système cobotique. Elles peuvent porter sur la structure et le fonctionnement du système robot, vis-à-vis de la réalisation de la tâche et de son implantation dans l'environnement. Pour cela, des simulations numériques 3D peuvent, par exemple, permettre d'évaluer le placement et l'encombrement du robot dans le poste, les accessibilités, les singularités ou encore les temps de cycle. Un prototype fonctionnel peut également permettre d'évaluer la structure et le fonctionnement d'un système robot en conditions réelles.

En complément, les simulations participatives sont nécessaires pour faire émerger et analyser la nouvelle activité de travail des opérateurs avec le système robot. Elles permettent d'évaluer la marge de manœuvre laissée aux opérateurs pour faire face aux différentes situations de travail et à leurs variabilités, qui ont été identifiées et mises à jour lors de l'élaboration des hypothèses de conception.

Par ailleurs, ces simulations permettent d'observer les conséquences de cette nouvelle activité pour l'opérateur et pour l'entreprise (voir section 2.1.4.3). Les supports pouvant être utilisés pour réaliser des simulations impliquant les opérateurs ont été présentés précédemment (voir section 2.3.3.1). Dans la suite de la thèse, les simulations participatives réalisées correspondent à des tests utilisateurs, où les utilisateurs sont les opérateurs du poste de travail. Nous utiliserons les termes "simulation participative" et "test utilisateur" indifféremment.

L'approche que nous venons d'explicitier est appliquée à un projet industriel (le nettoyage de cuve de propergol) chez ArianeGroup dans les chapitres suivants. Le chapitre 3 présente le besoin industriel et la phase d'analyse préliminaire que nous avons menée. Le chapitre 4 présente la conception d'un système cobotique pour le nettoyage des cuves de propergol, à travers plusieurs itérations d'élaboration d'hypothèses de conception et de simulations participatives. Cette approche est également appliquée sur d'autres projets (plus récents et avec un avancement moindre) au sein d'ArianeGroup, dont nous faisons un retour d'expérience au chapitre 5.

Chapitre 3

Analyse du besoin industriel de nettoyage des cuves de propergol

Dans ce chapitre, nous présentons le poste de nettoyage des cuves de propergol chez ArianeGroup, pour lequel un besoin d'améliorer la santé et la sécurité des opérateurs nous a été confié. Nous détaillons l'analyse du poste de travail et de l'activité des opérateurs, que nous avons mené pour comprendre les contraintes du poste, les déterminants, l'expertise des opérateurs et leurs besoins réels. Cette analyse préliminaire, complétée par un état de l'art des solutions potentielles révèle un intérêt à envisager une solution cobotique pour améliorer ce poste de travail. Nous nous appuyons dans ce chapitre sur l'approche introduite précédemment pour conduire les analyses et formaliser les besoins pour la conception du futur système cobotique, qui est ensuite décrite dans le chapitre 4.

3.1 Description du besoin industriel

L'activité principale d'ArianeGroup est le développement de lanceurs spatiaux. La société produit les lanceurs Ariane 5 et prépare la génération nouvelle Ariane 6. Ces lanceurs utilisent notamment un produit de propulsion solide, le propergol solide, qui est également fabriqué par ArianeGroup. Dans le cycle de production du propergol (schématisé sur la figure 3.1), les différents constituants sont homogénéisés dans des cuves puis coulés dans la structure qui va former le chargement. Une phase de réticulation (ou polymérisation) permet de rendre le propergol solide dans le chargement, afin de figer la forme du canal qui déterminera par la suite la courbe de poussée des boosters¹. Après la phase de coulée, du propergol résiduel à l'état pâteux reste dans les cuves. Celles-là doivent alors être nettoyées, pour être réutilisées dans les campagnes de production suivantes. Le propergol étant un matériau pyrotechnique, l'opération de nettoyage des cuves est potentiellement dangereuse. Elle nécessite donc des mesures particulières pour maîtriser les risques d'incident et réduire les effets en cas d'incident. Aujourd'hui, le nettoyage des cuves est réalisé manuellement par des opérateurs dans un atelier dédié (voir section 3.3.4). C'est une opération qui génère des postures contraignantes et des efforts importants chez les opérateurs.

Le propergol est fabriqué sur les sites d'ArianeGroup, à Kourou, en Guyane, et à Saint-Médard, en Aquitaine. Les cycles de production étant similaires, il existe un poste de nettoyage de cuve sur chacun de ces sites. Les cuves de Kourou ont cependant un volume 5 fois supérieur à celles de Saint-Médard, et les conditions climatiques guyanaïses (température proche de 30°C et hygrométrie avoisinant 90% toute l'année) y rendent le travail plus difficile.

Le besoin d'améliorer les conditions de travail des opérateurs sur le poste s'est ainsi manifesté principalement en Guyane, mais il est néanmoins présent, dans une moindre mesure, sur le site de Saint-Médard. Par ailleurs, avec le développement d'Ariane 6, une augmentation des cadences est

1. Les boosters sont des éléments de la fusée qui fournissent la majorité de la poussée au décollage.

prévue sur le poste de Guyane. Il y a un objectif supplémentaire de réduire la durée des opérations de nettoyage.

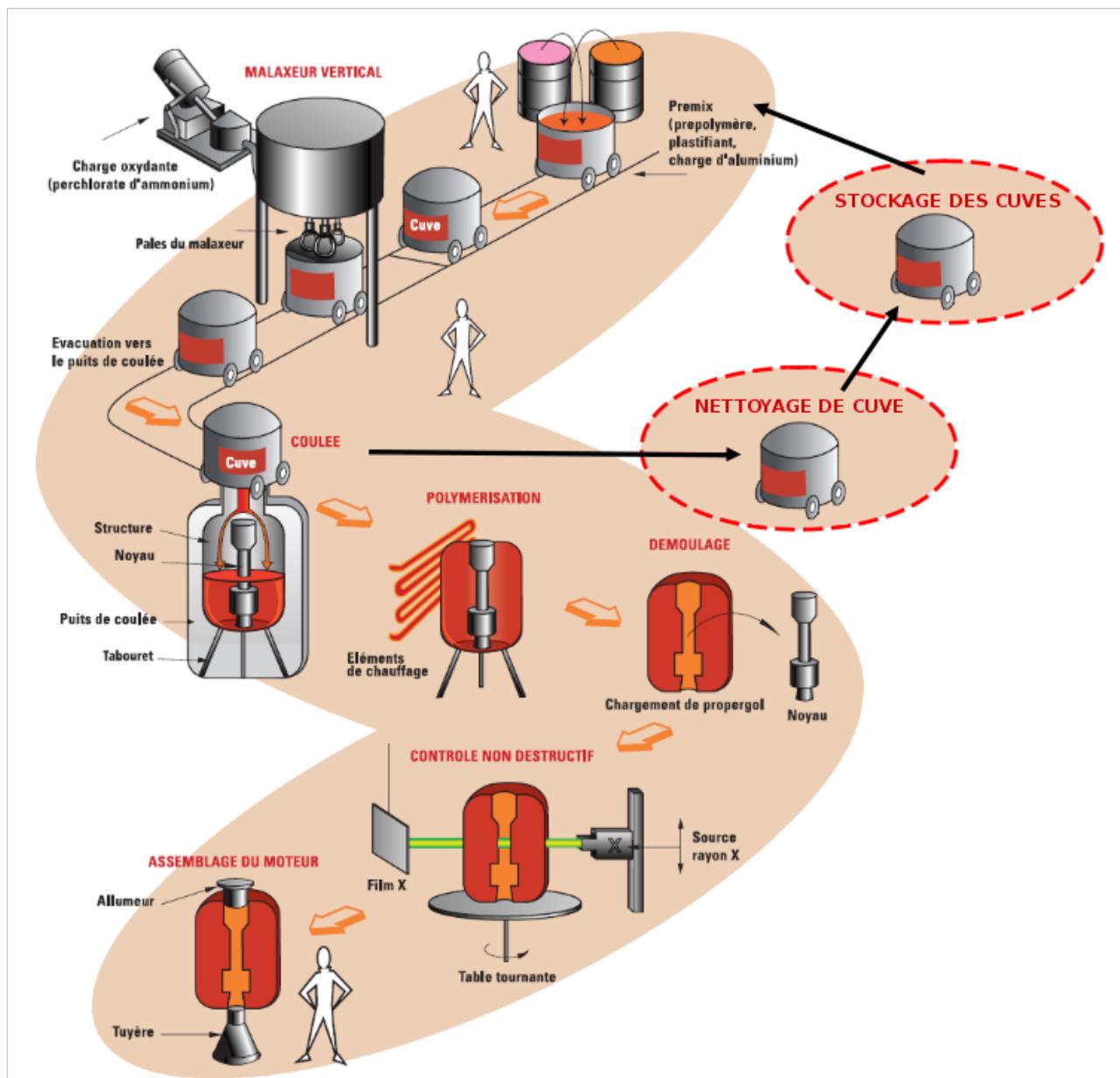


Figure 3.1 – Étapes principales du processus de fabrication du propergol et cycle de vie des cuves.

De nombreuses études internes ont été menées pour perfectionner ce poste de travail sur les deux sites (voir section 3.3.1). Ces études ont permis des améliorations du procédé de nettoyage (remplacement des produits toxiques utilisés et réduction des risques pyrotechniques), mais n'ont pas permis de réduire la fatigue physique. Une machine spéciale a été conçue et installée en Guyane, mais elle n'a été utilisée qu'une seule fois, car elle complexifiait trop les opérations.

Par ailleurs, en 2012, un accident pyrotechnique dramatique s'est produit sur le site de Saint-Médard. Cet accident a fait un mort et deux grands brûlés, suite à la prise en feu d'un bloc de propergol solide. Depuis l'objectif, sur le site, est de sécuriser les opérations pyrotechniques en éloignant l'opérateur lorsque cela est nécessaire.

En 2013, le groupe Safran a lancé un appel à projet, dans l'ensemble de ses sociétés, pour travailler sur l'amélioration des postes de travail par la cobotique. Safran Herakles (devenu ArianeGroup en 2017 suite à une joint-venture avec Airbus DS) y a répondu pour trouver de nouvelles solutions pour

l'amélioration du poste de nettoyage des cuves. L'objectif était double : améliorer la santé, la sécurité et la performance du nettoyage des cuves de propergol, tout en contribuant au développement de la cobotique.

3.2 Construction du projet et du groupe de travail

Pour répondre au besoin de nettoyage des cuves de propergol, un projet a été monté chez ArianeGroup. Le site guyanais est une usine de production, filiale d'ArianeGroup, utilisant les services d'étude et d'ingénierie présents sur le site de Saint-Médard. Il a donc été décidé de lancer le projet sur ce dernier, afin de réaliser les études et développements en métropole. Un des objectifs du projet est de déployer, à terme, les solutions sur le site guyanais.

Pour conduire le projet et avancer sur les études et développements, un comité de pilotage et un groupe de travail ont été constitués. Le groupe de travail – avec des points d'avancement bimensuelles – rassemble des représentants de la production, un responsable des études sur les procédés de fabrication du propergol et un binôme d'ingénieur doctorant en robotique et cognitique. Le but est de l'étude du poste de travail et le développement d'une solution cobotique. Ce comité de pilotage – avec des réunions bimestrielles – s'assure du respect des objectifs du projet et donne les orientations. Il regroupe, en plus du groupe de travail, le chef du service procédés, le chef d'atelier du nettoyage des cuves, le responsable de l'ergonomie du groupe Safran, un responsable de la politique industrielle d'ArianeGroup.

Avec la coordination du responsable de l'ergonomie du groupe Safran, notre binôme d'ingénieur doctorant en robotique et cognitique a eu pour rôle d'assurer l'intégration conjointe de l'homme, du système robot et de la tâche, dans le développement d'un système cobotique industriel.

En fonction des phases du projet, des représentants de l'industrialisation des moyens de production, de la sécurité pyrotechnique, des investissements, de la maintenance et du Comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail (CHSCT) d'ArianeGroup, ont participé à certaines des réunions du groupe de travail et du comité de pilotage.

3.3 Analyse préliminaire du poste de nettoyage des cuves

Avant de nous lancer dans la conception d'un système de nettoyage des cuves, nous avons réalisé une analyse préliminaire détaillée pour prendre en compte l'ensemble des besoins des opérateurs et des contraintes de la tâche, du poste de travail, d'organisation et de production. Cette étude préliminaire a compris :

- Une analyse des études précédentes réalisées au sein d'ArianeGroup, pour capitaliser les expériences passées (section 3.3.1).
- Une étude du poste de Saint-Médard et du travail prescrit, pour concevoir un système adapté aux contraintes du poste de travail et aux opérations à réaliser (section 3.3.2).
- Une analyse des postes amont et aval sur Saint-Médard, pour prendre en compte les contraintes de production de façon globale (section 3.3.3).
- Une analyse de l'activité de travail des opérateurs, pour collecter leurs besoins réels et les contraintes d'organisation (section 3.3.4).

3.3.1 Analyse des études internes précédentes

Dans le passé, plusieurs études ont été menées pour améliorer le poste de nettoyage des cuves. Nous les avons analysées et en présentons un retour d'expérience ci-après. Cette analyse donne des orientations pour la conception d'un système de nettoyage.

3.3.1.1 Études liées aux produits de nettoyage

Au sein d'ArianeGroup, de nombreux essais de procédés de nettoyage ont été réalisés sur les malaxeurs, cuves et outillages depuis 1985. Ces essais ont permis de faire évoluer les technologies employées sur les postes de travail de l'entreprise. Le trichloréthylène utilisé jusqu'à la fin des années 90 a été remplacé par d'autres produits, suite à sa classification en "carcinogène probable" en 1995 par le Centre international de recherche sur le cancer². La découverte de ses risques pour la santé des personnes et de son impact sur l'environnement a conduit à la recherche de produits de substitutions.

Aujourd'hui, un solvant est utilisé sur de nombreux postes d'ArianeGroup, notamment pour le nettoyage des outils. Sur le poste de nettoyage des cuves, un plastifiant a été choisi pour diluer et faciliter le nettoyage du propergol. Cependant le trichloréthylène, malgré ses risques, présentait l'avantage d'offrir un nettoyage facile des cuves. Le plastifiant, utilisé de nos jours, ne permet pas un nettoyage aussi efficace qu'avant.

3.3.1.2 Machine de nettoyage mécanique pour cuve de Guyane

Il y a une dizaine d'années, un système spécifique de nettoyage mécanisé avait été conçu pour nettoyer les cuves de Guyane. Cependant, le système n'a été utilisé qu'une fois car il était plus long à nettoyer que la cuve elle-même. Par ailleurs, sa mise en place dans la cuve nécessitait l'utilisation du pont de l'atelier, ce qui était à la fois coûteux en temps et en efforts pour les opérateurs.

3.3.1.3 Évaluation du procédé de nettoyage par hydrogommage

À partir de 2010 des essais ont été réalisés au sein d'ArianeGroup afin d'évaluer, parmi un ensemble de nouvelles technologies, celle qui serait la plus apte à améliorer l'efficacité du nettoyage des cuves. L'hydrogommage – un procédé qui consiste à projeter un mélange d'eau, d'air et de granulats sur une surface – a été alors identifié comme bon candidat, devant l'aérogommage et l'eau sous pression. Des essais complémentaires ont été réalisés jusqu'en 2013 pour valider l'hydrogommage et préciser les paramètres de nettoyage. Ces essais ont montré que le procédé était efficace pour décoller le propergol de la surface à nettoyer. La figure 3.2 illustre l'utilisation de cette technologie pour nettoyer le propergol collé sur des surfaces en inox.



Figure 3.2 – Essais d'hydrogommage sur plaque avec du produit inerte (à gauche), et sur cuve de propergol en Guyane (à droite).

Nous avons repris ces essais pour évaluer son efficacité sur une cuve à Saint-Médard. Ces essais ont montré que l'hydrogommage pouvait effectivement faciliter le décollage du propergol de la surface des cuves, cependant ils ont également mis en valeur les inconvénients suivants lors de l'utilisation de cette technologie de nettoyage :

2. Cette classification a été entérinée en 2001 par la directive européenne 2001/59/CE.

- La pression du mélange d'eau, d'air et de granulats est telle que le propergol est projeté sur les surfaces de la cuve préalablement nettoyées, sur le système de nettoyage et même dans l'atelier.
- Une quantité importante d'effluents (mélange d'eau, de propergol et de granulats) est générée, et est difficile à évacuer par l'orifice central de la cuve, à cause du fond plat et du diamètre relatif de l'orifice par rapport au fond de cuve.
- Un système de filtration des effluents est nécessaire pour séparer la portion solide et les effluents liquides à traiter à la station biologique du site.

Cette solution s'est avérée complexe à mettre en œuvre, générant beaucoup de déchets pour une efficacité relative.

3.3.1.4 Synthèse

Les données pouvant être retenues, de ces études et procédés de nettoyage de cuve, sont synthétisées dans le tableau 3.1 qui suit.

Études	Retour d'expérience
Solvants ou fluide	Il reste peu de levier pour améliorer le nettoyage des cuves en changeant les produits de nettoyage. Le plastifiant est le produit recommandé.
Machine de nettoyage mécanique en Guyane	Le système robot doit pouvoir être mis en place dans la cuve et retiré simplement. Le nettoyage du système robot (outils compris) doit être prise en compte dans la conception, pour en minimiser la durée.
Procédé de nettoyage par hydrogommage	La partie solide des effluents doit être filtrée avant traitement des déchets à la station biologique. Les risques de projections de produits sur le système et dans l'atelier doivent être limités à la conception. L'évacuation, la récupération et le traitement des effluents doivent être intégrés dans les phases de fonctionnement du système. Les opérations supplémentaires, que devront réaliser les opérateurs suite à l'introduction du système et au changement de procédé de nettoyage, doivent être évaluées lors de la conception.

Tableau 3.1 – Synthèse des résultats issus des études précédentes de nettoyage de cuve chez ArianeGroup.

3.3.2 Étude du poste et du travail prescrit

Sur le site de Saint-Médard, deux types de document se complètent pour décrire les opérations réalisées et les contraintes liées au poste : les instructions de travail et l'étude de sécurité au travail (EST).

Les instructions de travail sont réalisées par les methodistes³ et utilisées par les opérateurs au poste de travail. Elles décrivent l'enchaînement des opérations (déplacements, contrôles qualité, actions sur produit) qui doit permettre d'obtenir le résultat souhaité. Leur étude permet de connaître le travail prescrit et le résultat attendu des tâches. Ces instructions de travail contiennent également les descriptions des produits (références, caractéristiques) sur lesquels les opérateurs agissent, ainsi que les outils et équipements de protection individuelle (EPI) qu'ils doivent utiliser.

En complément des instructions de travail, nous avons étudié l'EST du bâtiment. Spécifique au travail sur produit pyrotechnique, l'EST d'un bâtiment décrit les dangers contenus dans les différents

3. C'est-à-dire les personnes qui sont responsables de décrire les méthodes de travail. Plus généralement les instructions de travail peuvent être écrites par l'exploitant du poste de travail.

locaux (quantité et sensibilité des produits), les opérations autorisées, les risques associés pour le personnel et pour le matériel (inflammation, déflagration, détonation) et leur zone d'effet. Elles décrivent également les mesures de prévention et de protection, qui permettent de réduire les risques (limitation d'effort durant les opérations, matériaux et mise à la terre des outils, flegmatisation des déchets pyrotechniques dans l'eau, autorisations d'accès) et leurs effets (limitation du nombre de personnes par local, issues de fuite, quantité maximale de produit autorisée, murs forts).

L'étude de ces documents, complétée par celle des plans d'atelier et des cuves, par des visites de l'atelier avec le chef d'atelier et les méthodistes, et par des discussions avec les ingénieurs responsables de la formulation (chimique) du propergol et des procédés de fabrication nous a permis de collecter les éléments suivant sur le poste, le produit et les opérations réalisées.

Résultats de l'étude

Le poste de travail du site de Saint-Médard sert à nettoyer les cuves souillées de propergol à l'état pâteux. Les cuves sont cylindriques et sont composées principalement d'une virole (paroi latérale circulaire) et d'un fond. Au centre du fond de la cuve, un orifice permet l'extraction du produit de la cuve lors de la phase de coulée. Les cuves de Saint-Médard ont un diamètre intérieur de 1.6 m et une hauteur intérieure de 1.14 m ; l'orifice de fond de cuve fait 12 cm de diamètre. Les cuves sont en inox poli et ont une masse totale de 4 tonnes. Des outillages sont présents sous la cuve mais ils ne sont pas traités dans le cadre de ce projet. En particulier une vanne placée sous la cuve permet de boucher l'orifice. L'épaisseur maximale de produit présente en fond de cuve est de l'ordre de quelques centimètres.

Le propergol est un polymère énergétique constitué d'un mélange de comburant, de combustible. La réticulation est un processus chimique permettant de transformer le mélange liquide en produit solide. La viscosité du propergol dépend de la composition du mélange, du niveau de réticulation et de sa température. Elle peut varier entre 500 Pa.s et 3000 Pa.s. Plus le niveau de réticulation est élevé, plus la viscosité est élevée. Pour un niveau de réticulation donné⁴, la viscosité diminue lorsque la température du produit augmente. Cependant, le niveau de réticulation augmente plus rapidement pour des températures élevées. Ces lois d'évolution ne sont pas linéaires et dépendent du type de polymérisation. Le comportement rhéologique du propergol est donc difficile à modéliser, en fonction de la durée de réticulation et des variations de température qui sont inconnues avec précision. Les opérateurs ont l'expertise pour réguler ces variabilités. Cette expertise pourrait être conservée en développant un système cobotique qui intègre les opérateurs.

La production du propergol est organisée en campagnes de coulée au cours desquelles les cuves arrivent au poste de nettoyage par intervalle de 3-4 heures. À chaque fois, deux opérateurs travaillent en même temps sur le poste. Lors de ces campagnes, une dizaine de cuves peuvent s'enchaîner et les opérateurs travaillent alors en 3x8. Certaines compositions chimiques de propergol sont toutefois fabriquées en une cuve. Il n'y a donc pas toujours d'enchaînement. Hors des campagnes de production, ces mêmes opérateurs peuvent travailler en 2x8 et être affectés sur d'autres postes.

L'atelier est composé de deux étages. Au rez-de-chaussée les opérateurs effectuent les opérations liées aux outillages sous la cuve (bridage, démontage, mise de poubelle sous l'orifice, nettoyage). À l'étage (cf. figure 3.3), ils effectuent les opérations liées à la mise en place de la cuve et à son nettoyage. Un autre local attenant est utilisé pour le nettoyage de la vanne et pour contrôler son extraction à distance.

4. Le niveau de réticulation correspond à la quantité de liaisons chimiques formées.



Figure 3.3 – Étage supérieur de l’atelier de nettoyage des cuves de propergol de Saint-Médard. Vues sans et avec cuve à poste.

Le travail prescrit par les instructions de travail du poste est synthétisé dans le tableau 3.2, avec l’enchaînement des étapes principales et les opérations associées. On peut remarquer dans ce tableau que les opérateurs n’effectuent pas seulement des opérations de nettoyage de la cuve mais aussi d’autres opérations liées à la préparation de l’atelier, la mise en place de la cuve, la manipulation et le démontage de pièces, la gestion des outils, et les rangements et nettoyages annexes.

Les outils et les EPI utilisés dépendent de la classe de risque du propergol. En fonction de la composition du produit, sa sensibilité aux chocs, aux frictions, à la température et à l’électricité statique varie. Les opérateurs, les outils et les outillages sont reliés à la terre, pour éviter le transfert de charges électriques sur le propergol. Pour limiter l’impact en cas de prise en feu, les opérateurs ne peuvent pas nettoyer en même temps les parois de la cuve et les outillages sous la cuve.

Étapes	Opérations prescrites
Préparation avant l'arrivée de la cuve	S'équiper avec les EPI et préparer l'atelier (récupération d'un carton de chiffons, mise de papier kraft au sol pour limiter les salissures, préparation des poubelles, etc.).
Arrivée de la cuve	Une fois la cuve déposée sur les rails par un cariste, la faire avancer jusqu'en butée, à l'aide de moteurs pneumatiques.
Retrait du couvercle	Retirer le couvercle posé sur la cuve et le déposer dans un coin de l'atelier.
Dégagement de l'orifice central de la cuve (vanne)	Dégager le propergol se trouvant au dessus de la vanne avec une raclette, pour éviter qu'il ne tombe lors de l'extraction de celle-ci.
Extraction de la vanne*	Accrocher la vanne à une table élévatrice pneumatique et extraire la vanne à distance**, en commandant la descente de la table. Amener la table élévatrice et la vanne dans un autre local et placer une poubelle sous l'orifice de la cuve.
Raclage de la cuve	Racler la virole et le fond de cuve, et évacuer le produit par l'orifice central.
Grattage	Gratter les traces restantes sur les parois et le fond de cuve, à l'aide de plusieurs outils (balais-brosses, chiffon, brosse abrasive) et de plastifiant.
Nettoyage des outillages sous cuve	Curer et nettoyer sous la cuve les parties souillées, difficiles d'accès depuis le haut de cuve.
Finition	Rentrer dans la cuve pour inspecter et nettoyer les dernières traces de propergol à l'aide de chiffons.
Changement de poubelle	Sortir les poubelles de déchets pleines du bâtiment, et les remplacer par des poubelles vides.
Remontage de la vanne	Remonter la vanne propre, à distance, à l'aide de la table élévatrice. Vérifier son bon fonctionnement en prenant une mesure de pression à vide.
Remise du couvercle	Replacer le couvercle sur la cuve.
Départ de la cuve	Sortir la cuve de l'atelier, sur les rails à l'aide des moteurs pneumatiques.
Rangements et nettoyages annexes	Nettoyer les outils, et l'atelier en fin de campagne de coulée.

*La vanne est nettoyée en parallèle du nettoyage de la cuve, dans un autre local.

**L'opération se fait depuis un autre local et à vitesse contrôlée, car le risque pyrotechnique est plus élevé, du fait des frottement entre matériaux.

Tableau 3.2 – Synthèse du travail prescrit pour les opérateurs, issu des instructions de travail sur le poste de nettoyage des cuves.

Synthèse

De ces résultats, on retient en particulier les informations suivantes pour la conception du système :

- Les cuves à nettoyer sur le poste de Saint-Médard sont toutes identiques.
- L'épaisseur maximale de propergol présente en fond de cuve est de l'ordre de quelques centimètres.
- La viscosité du produit peut varier entre 500 Pa.s et 3000 Pa.s.
- Jusqu'à une dizaine de cuves peuvent s'enchaîner sur le poste de nettoyage par intervalle de 3-4 heures.
- Le nettoyage de la cuve ne représente qu'une partie de l'ensemble des opérations réalisées au poste.
- Le projet vise à améliorer les étapes de nettoyage des parois intérieures de la cuve (virole et fond). Ces étapes sont réalisées depuis la partie haute de l'atelier.
- Actuellement deux opérateurs sont nécessaires pour réaliser les différentes opérations du poste.
- Différents outils sont utilisés pour le nettoyage. Leurs longueurs et formes sont adaptées à la surface de la cuve à nettoyer. Leur matériaux et les EPI des opérateurs sont adaptés à la classe de risque pyrotechnique qui dépend de la composition chimique du propergol.

3.3.3 Analyse des postes amont et aval

Les postes amont, de malaxage et coulée, ont une influence sur les caractéristiques du produit à nettoyer (température et viscosité du propergol) et la quantité de propergol restant dans la cuve. Les

besoins de production déterminent la composition chimique et la quantité de propergol à fabriquer. Ces influences sont décrites dans les paragraphes suivants.

ArianeGroup fabrique différents types de chargement, dont les dimensions varient. À chaque type de chargement est associé une composition de propergol. Jusqu'à plusieurs dizaines de tonnes de produit sont coulées dans les plus grands chargements, ce qui correspond à une dizaine de cuves. Or, pour des raisons de sécurité et de reproductibilité du processus de malaxage, une quantité fixe – de plusieurs tonnes – de propergol est mélangée dans chaque cuve. Les premières cuves de la production sont vidées au maximum lors de la coulée mais pas la dernière, car une marge est prise sur la quantité de propergol produite. Les premières cuves à nettoyer contiennent moins de 1 cm d'épaisseur de propergol en fond de cuve et la dernière en contient plusieurs centimètres.

Par ailleurs, en fonction de la composition chimique, la coulée du propergol est effectuée à température (supérieure à la température ambiante) et viscosité maîtrisées. Lorsque les cuves sont transportées entre le poste de coulée et le poste de nettoyage, la température du propergol diminue en fonction de la température extérieure et la viscosité augmente en conséquence. La viscosité du produit à nettoyer peut donc varier entre 500 Pa.s et 3000 Pa.s et est difficilement prévisible puisque les variations de température ne sont pas connues précisément. Enfin, un piston racleur est utilisé pendant la coulée pour pousser le produit depuis le haut de la cuve. Après son passage il reste moins de 1 mm d'épaisseur de produit sur la surface latérale de la cuve.

Après le nettoyage des cuves, celles-ci sont stockées dans un bâtiment spécifique avant leur prochaine utilisation. Les cuves doivent être parfaitement propres car des traces restantes pourraient continuer de polymériser et devenir solides. Or dans cet état le propergol est plus sensible à la température, aux chocs et aux frottements, ce qui présenterait un risque pyrotechnique lors d'un nouveau malaxage avec une cuve souillée.

Synthèse

On retient ainsi les informations suivantes pour la conception du système :

- L'épaisseur de propergol à nettoyer en fond de cuve varie entre quelques millimètres et plusieurs centimètres.
- La viscosité du produit arrivant au poste de nettoyage des cuves, qui varie entre 500 Pa.s et 3000 Pa.s, est difficilement prévisible.
- À l'issue de la coulée, l'épaisseur de produit sur la paroi latérale est inférieure à 1 mm.
- Le nettoyage de la cuve est impératif pour la sécurité pyrotechnique lors des utilisations suivantes.

3.3.4 Analyse de l'activité de travail des opérateurs

L'analyse de l'activité des opérateurs permet de comprendre leur travail en situations réelles. Elle permet notamment de dégager les déterminants de l'activité de travail des opérateurs, et de relever les situations non prévues et les régulations des opérateurs face aux variabilités. On peut noter que l'étude des instructions de travail est importante, car les écarts entre le travail prescrit et le travail réel, mettent en valeur les régulations des opérateurs.

Pour analyser l'activité de travail des opérateurs, nous avons mis en place les étapes suivantes :

- Interview des opérateurs : pour valider la compréhension du travail prescrit, discuter avec les opérateurs de la manière dont ils y répondent, et dégager les situations non prévues (telles que les fonctionnements dégradés et les incidents).
- Observations : pour cerner l'activité des opérateurs en conditions réelles de travail. Cela permet notamment de mettre en valeur les comportements et actions plus ou moins conscients des opérateurs qui leur permettent d'optimiser des opérations (pour gagner du temps ou réduire leur fatigue par exemple) et de répondre aux imprévus.
- Débriefing : pour discuter, valider et enrichir, avec les opérateurs, les données collectées.

Les observations ont été réalisées en deux étapes. En premier lieu, nous n'avions pas les autorisations pour être présents dans l'atelier lors d'opérations pyrotechniques. Nous avons donc mis en place des caméras dans l'atelier avec l'accord des opérateurs (voir figure 3.4). Elles ont permis, en l'espace de deux semaines, d'enregistrer et analyser le nettoyage de 15 cuves différentes.

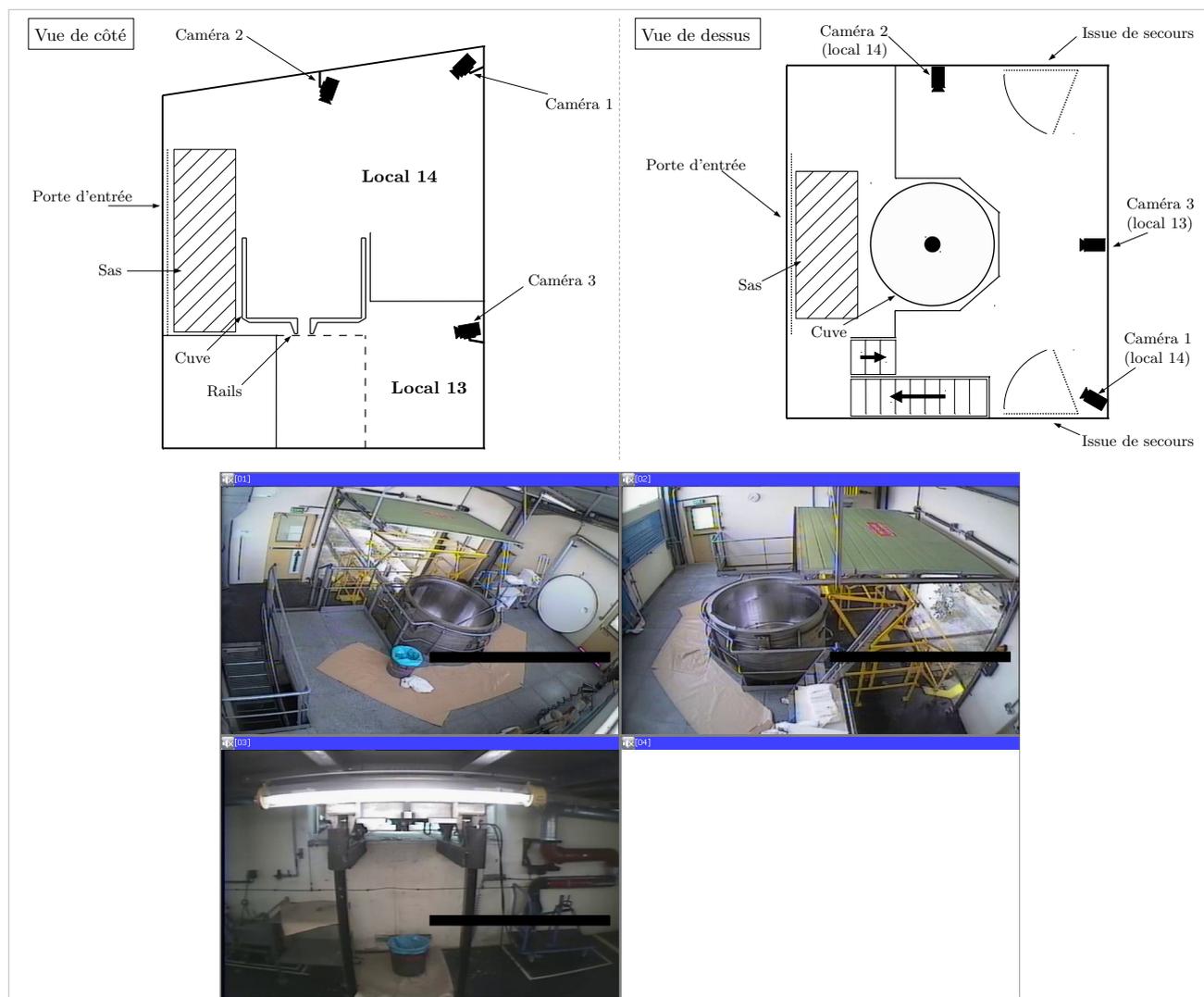


Figure 3.4 – Placement des caméras et retours vidéo pour l'observation de l'analyse de l'activité des opérateurs. Les schémas du dessus illustrent le positionnement des caméras dans l'atelier suivant deux plans de coupe. La capture d'écran du bas montre les retours visuels issus des trois caméras. Deux caméras filment la partie supérieure de l'atelier pour les opérations effectuées autour et dans la cuve. Une caméra capture les opérations effectuées sous la cuve.

Cette analyse était cependant limitée par le manque d'échanges directs avec les opérateurs, et par la distance de visualisation des opérations. Par la suite, une analyse de l'activité a pu être réalisée sur le poste, durant les opérations.

Résultats de l'analyse de l'activité des opérateurs

Les étapes principales du nettoyage de la virole et du fond de la cuve sont le raclage, le grattage et la finition. Les deux premières étapes se font depuis l'extérieur de la cuve (cf. figure 3.5). Le raclage permet de retirer la majorité du propergol de la cuve, en le poussant vers l'orifice central du fond de cuve. Pour cela, les opérateurs utilisent des raclettes dont le manche fait environ 2 m de long. L'étape de grattage permet de décoller et retirer la majorité des traces restantes. Les opérateurs se servent

alors d'un balais-brosse, de brosses abrasives et de chiffons. Lorsqu'il ne reste plus que de faibles traces de produit, les opérateurs rentrent dans la cuve pour assurer la finition à l'aide de chiffons. Cela leur permet également d'être au plus proche pour inspecter la qualité de nettoyage.



Figure 3.5 – Photos du raclage (à gauche) et du grattage (à droite), du propergol dans une cuve à Saint-Médard.

Les déterminants, dont les variations (variabilités) influencent notablement l'activité des opérateurs, sont listés dans le tableau 3.3.

Catégorie	Déterminants
Opérateur	(O1) Force (O2) Taille (O3) Expertise (O4) Santé et fatigue
Matériel	(Ma1) Matériaux des raclettes (Ma2) Longueur des outils (Ma3) Forme des outils (Ma4) Saleté des outils
Produits	(P1) Sensibilité du propergol (P2) Viscosité et pégosité du propergol (P3) Quantité de propergol (P4) Forme de la surface de la cuve (P5) Défauts sur la surface de la cuve (P6) Réflexions sur la surface de la cuve (P7) Couleur du propergol
Méthodes	(Me1) Cadence de production (Me2) Travail de nuit
Milieu	(Mi1) Luminosité et lumières (Mi2) Température et hygrométrie

Tableau 3.3 – Déterminants principaux de l'activité actuelle de nettoyage.

Ce tableau permet de mettre en valeur les variabilités principales, suivant les cinq catégories de déterminants présentées précédemment (cf. section 2.3.4). Celles dont l'influence est moindre, ou est exprimée à travers d'autres déterminants, ne sont pas représentés. Par exemple la composition chimique du propergol peut varier, mais ses impacts sur l'activité s'expriment à travers la sensibilité, la viscosité, la pégosité et la couleur du propergol, qui sont relevés dans le tableau (respectivement, P1, P2 et P7). La réticulation du propergol influe également sur le nettoyage des cuves. En effet, elles doivent être nettoyées rapidement après la coulée car l'augmentation de la viscosité du propergol dans le temps accroît la difficulté du nettoyage pour les opérateurs. De plus, lorsque le propergol s'approche de l'état solide, la sensibilité du produit augmente et des opérations spécifiques doivent être réalisées pour retirer le produit de la cuve.

Nous avons synthétisé l'activité de travail des opérateurs dans un diagramme, en suivant l'ordre chronologique des tâches prescrites, et en détaillant les variabilités et les régulations réalisées par les opérateurs à chaque étape. La méthode de formalisation des connaissances utilisée (MASK) est présentée dans la thèse de Moulières-Seban [MS17]. Ici nous en prenons un extrait pour illustrer les différences observées entre travail prescrit et travail réel (voir figure 3.6).

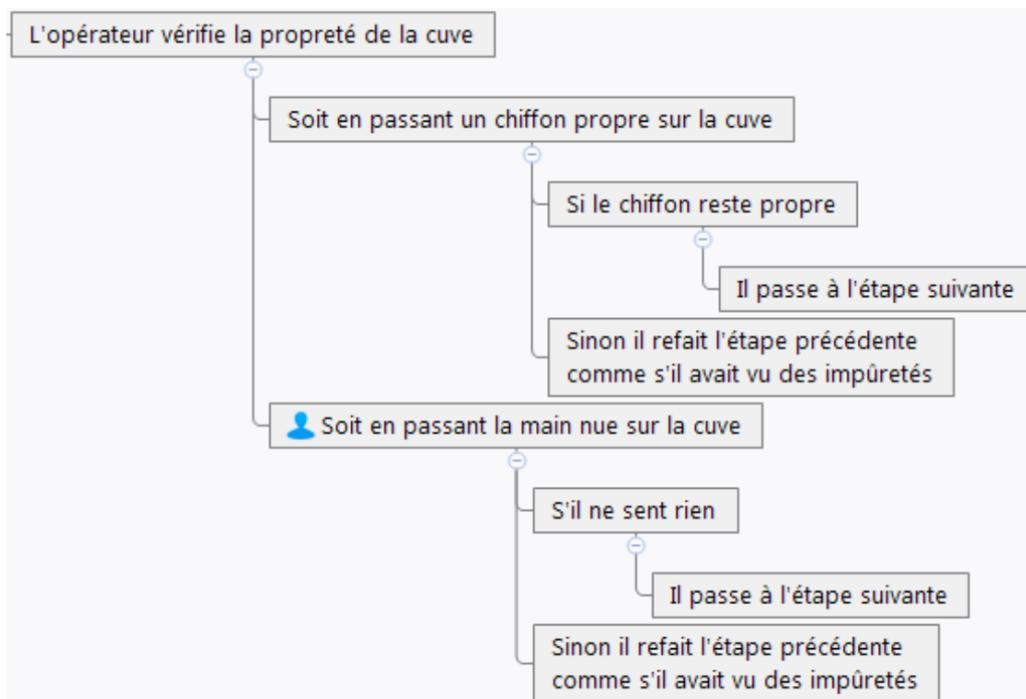


Figure 3.6 – Extrait du diagramme formalisant l'activité des opérateurs sur le poste de nettoyage des cuves de Saint-Médard. L'inspection de la propreté de la cuve est détaillée.

Sur cet exemple, nous détaillons l'inspection de la propreté de la cuve, effectuée pendant l'étape de finition. Dans les instructions de travail, il est prescrit de vérifier la propreté de la cuve, sans autre indication. En observant le travail des opérateurs, différentes stratégies pour répondre à cet objectif émergent, et varient en fonction des opérateurs et des situations. Le propergol étant de couleur grise, de même que la cuve, il est difficile de contrôler la propreté de l'ensemble de la cuve en regardant directement sa surface. Ainsi, les opérateurs passent, en général, un chiffon blanc propre sur la surface de la cuve pour vérifier l'absence de trace de produit. Cependant, le plastifiant utilisé pendant le nettoyage laisse un dépôt gras sur la surface de la cuve. Lorsque les opérateurs passent le chiffon, les traces de plastifiant rendent plus difficile le discernement des traces de propergol sur le chiffon.



Figure 3.7 – Aspect d'un chiffon après utilisation en fin de finition du nettoyage. Les traces sombres sont un mélange de plastifiant et de propergol.

La figure 3.7, montre un chiffon légèrement sale, après passage sur une surface ayant de faibles traces de propergol. Les traces de propergol (plus foncées) sont difficiles à discerner des traces de plastifiant (plus claires). Ainsi certains opérateurs peuvent être amenés à passer directement la main nue sur la surface de la cuve pour sentir, au toucher, s'il reste des traces de propergol lorsqu'elles sont peu visibles.

On peut voir la surface d'une cuve propre, à la fin des opérations de nettoyage, sur la figure 3.8. La lumière ambiante, les conditions d'éclairage, l'état de surface de la cuve (rayures et chocs), les reflets et les traces de plastifiant rendent difficile l'automatisation du contrôle de l'état de propreté de la surface. L'expertise des opérateurs semble nécessaire pour valider la propreté d'une cuve.



Figure 3.8 – Photo de l'état de surface d'une cuve propre.

Formalisation des résultats pour la conception d'un système de nettoyage des cuves

L'exemple de l'activité de finition illustre les informations collectées sur le travail des opérateurs lors de l'analyse de l'activité. Pour faciliter l'exploitation de ces données pour la conception, nous avons proposé dans la section 2.3.4 de les synthétiser suivant un découpage de la tâche principale en sous-tâches (cf. figure 3.9).

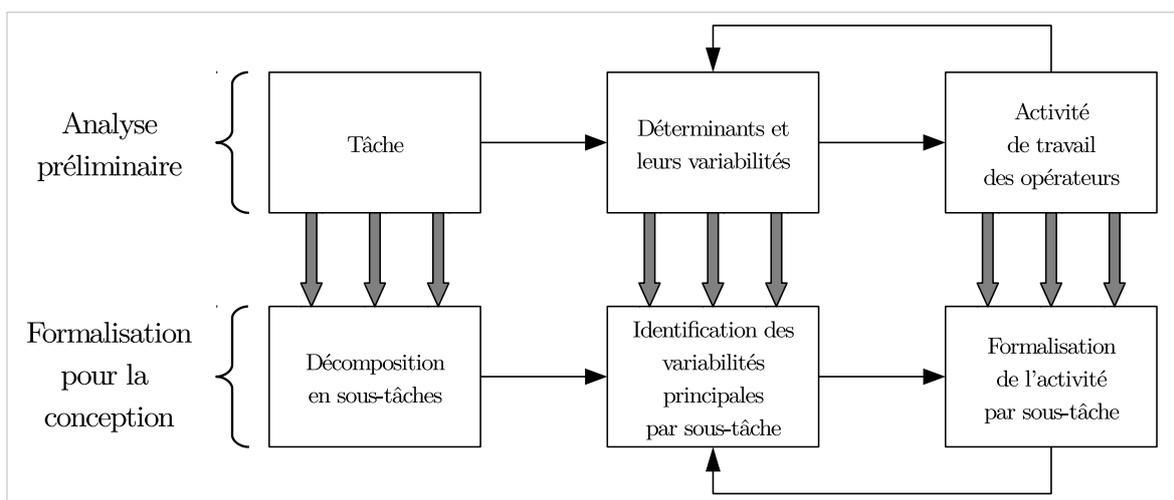


Figure 3.9 – Formalisation de l’analyse préliminaire pour la conception, suivant une décomposition en sous-tâches.

Ici, la tâche principale étudiée est le nettoyage des parois intérieures (fond et virole) de la cuve. La finition est considérée comme une de ses sous-tâches. Pour formaliser l’activité de finition, le modèle de l’homme au travail (cf. section 2.1.4.3) peut être utilisé. Ainsi, l’activité de finition, ses déterminants et ses conséquences sont formalisés dans la figure 3.10.

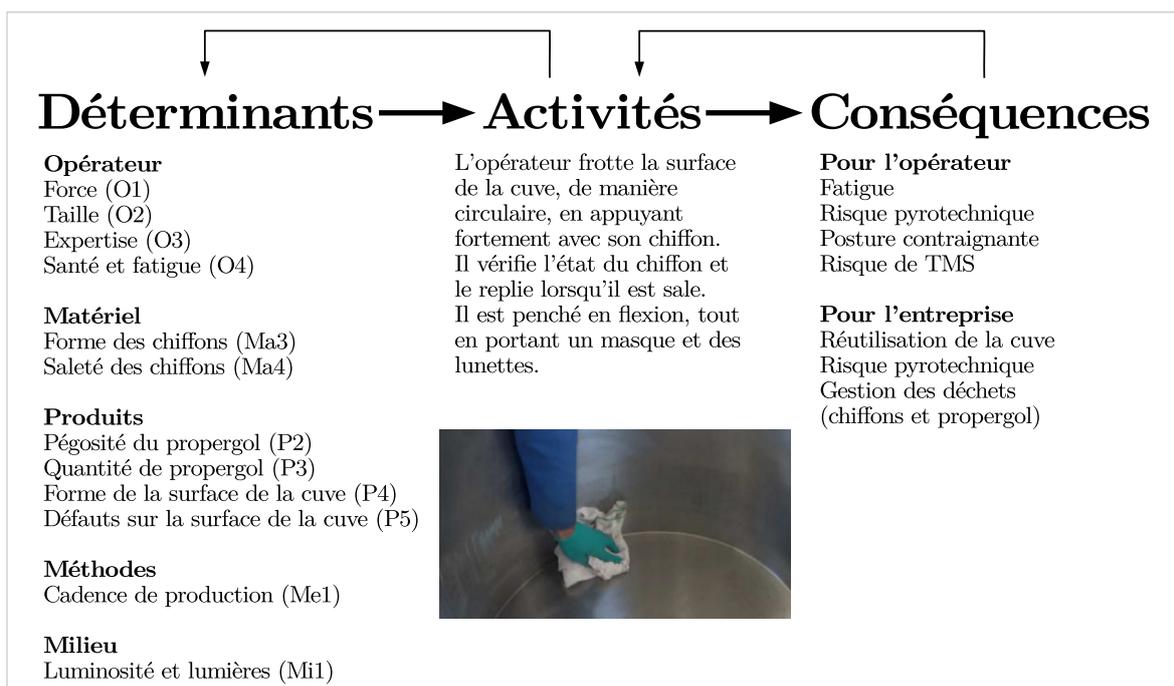


Figure 3.10 – Déterminants et conséquences de l’activité de finition du nettoyage.

Réaliser cette formalisation pour chaque sous-tâche permet d’identifier les déterminants et les variabilités principales de chaque activité. Cela permet de mettre en valeur la marge de manœuvre qui doit être laissée aux opérateurs, et leur expertise, dans les différentes parties de la tâche. Nous avons réalisé cette formalisation pour les différentes sous-tâches du nettoyage des cuves. Une synthèse en est présentée dans le tableau 3.4 qui associe à chaque sous-tâche, les déterminants et un résumé de l’activité actuelle des opérateurs.

Tâche	Déterminants actuels	Activité actuelle de l'opérateur
Choix et changement de raclette	(O2-3, Ma1-3, P1-4, Mi2)	Choisir et prendre la raclette appropriée
Raclage	(O1-4, Ma2-3, P1-4, Me1, Mi2)	Adapter les trajectoires et efforts de raclage
Pulvérisation plastifiant, grattage	(O1-4, Ma2-4, P2-4, Me1)	Adapter les trajectoires et efforts de grattage
Finition aux chiffons	(O1-4, Ma3-4, P2-5, Me1, Mi1)	Adapter les trajectoires et efforts de nettoyage
Changement de chiffon	(O3, Ma4)	Décider suivant l'efficacité du nettoyage
Contrôle de la qualité	(O3-4, P5-7, Me1-2, Mi1)	Inspecter visuellement ou au toucher

Tableau 3.4 – Synthèse des sous-tâches actuelles du nettoyage de la cuve, des déterminants associés et de l'activité de l'opérateur.

Cette synthèse des résultats de l'analyse de l'activité des opérateurs offre un support pour la conception du futur système de nettoyage des cuves, décrite dans le chapitre 4. Notre analyse montre la nécessité de conserver l'expertise de l'opérateur dans le futur système. Un système cobotique est donc pressenti pour améliorer le nettoyage des cuves de propergol.

3.4 État de l'art des moyens de nettoyage

L'analyse préliminaire a permis de récolter des données sur le travail de l'homme. Pour préparer l'élaboration des hypothèses de conception, il est également nécessaire d'étudier les solutions techniques pouvant répondre au besoin du projet. Dans cette section, un état de l'art des moyens de nettoyage est ainsi réalisé. Leur adaptation au besoin du nettoyage des cuves de propergol est évalué.

3.4.1 Technologies et automation du nettoyage

Harrington recense et classe les différentes technologies de nettoyage que l'on retrouve dans l'industrie [Har01] (voir tableau 3.5). D'après lui, les catégories principales sont les technologies de nettoyage chimique, mécanique et hydrodynamiques. Ces technologies se retrouvent dans les moyens de nettoyage existants, décrits dans les sections suivantes.

Chimique	Mécanique	Hydrodynamique
Solvants (spray ou vapeur)	Brosses	Eau sous basse pression (2 à 10 bar)
Solutions chimiques	Piston racleur	Eau sous moyenne pression (10 à 250 bar)
Ébouillantage	Forage	Eau froide sous haute pression (250 à 1200 bar)
Ruissellement ("streaming")	Raclage	
Ultrasonique	Sablage*	
	Cristaux de glace	

*(avec du sable, ou avec du bicarbonate de soude soluble)

Tableau 3.5 – Classification des différentes technologies de nettoyage industrielles, adapté de Harrington [Har01].

L'automation du nettoyage s'est développée pour une variété d'applications. Elkmann et ses collaborateurs distinguent deux catégories d'applications : le nettoyage des sols, et le nettoyage des façades, piscines, conduits de ventilation et canalisations d'eaux usées [EHF09].

La première catégorie correspond aux systèmes de nettoyage les plus répandus. Ces systèmes visent des applications monotones, telles que passer l'aspirateur et laver le sol. L'ensemble des systèmes développés sont des robots mobiles autonomes, se déplaçant à l'aide de roues.

La seconde catégorie vise principalement des zones difficiles, voire impossibles d'accès pour l'homme. Les systèmes sont alors autonomes ou commandés à distance. Les surfaces couvertes pour ces applications étant vastes, on retrouve des robots mobiles, ils se déplacent à l'aide de roues, de câbles, ou d'autres technologies pour grimper les surfaces verticales.

3.4.2 Nettoyage de produits chimiques et pyrotechniques

Dans l'industrie pétrochimique, les problématiques d'inspection et de nettoyage du réservoir de stockage contenant du produit inflammable, sont comparables aux nôtres. Shukla et Karki présentent un état de l'art des robots d'inspection des tuyaux et réservoirs pour cette industrie [SK13]. La plupart des robots conçus pour l'inspection des réservoirs sont des robots mobiles et des robots grimpant les surfaces verticales.

Deng et ses collègues présentent un robot pour nettoyer des cuves fermées de pétrole [DXLZ10]. Lors du stockage du pétrole, différentes impuretés se déposent et forment un résidu qui doit être enlevé régulièrement. Avant l'introduction de ce robot, les méthodes de nettoyage employées étaient principalement manuelles, pour des raisons de coût. Cependant, elles exposaient l'homme à un milieu toxique et dangereux, et les opérations étaient peu efficaces. Le système proposé permet de soulager et protéger les travailleurs, améliorer la sécurité et réduire le temps de nettoyage. Le robot dispose d'une lance de nettoyage haute pression et d'une pelle pour racler les résidus qui sont ensuite aspirés par une pompe à l'extérieur de la cuve (cf. figure 3.11).



Figure 3.11 – Robot de nettoyage de résidus dans une cuve de pétrole, repris de Deng et al. [DXLZ10].

L'opération est contrôlée à distance à l'extérieur de la cuve à l'aide d'une console, avec retour vidéo de l'intérieur de la cuve. Les tests réalisés sur une cuve de 5000 m³, avec 200 mm d'épaisseur de résidus montrent des résultats meilleurs que le nettoyage manuel, notamment lorsque le jet d'eau haute pression est combiné au raclage.

3.4.3 Nettoyage de cuves et outillages

Progressive Surface⁵ propose des services et machines industrielles pour nettoyer les outillages. Ces machines sont composées de robots industriels projetant de l'eau sous haute pression dans des cabines fermées. Pour les pièces cylindriques, un axe supplémentaire est intégré au système robot. Les pièces sont entraînées en rotation autour de leur axe de révolution, tandis qu'un robot industriel projette de l'eau, en se déplaçant selon un plan de coupe de la pièce (voir figure 3.12).

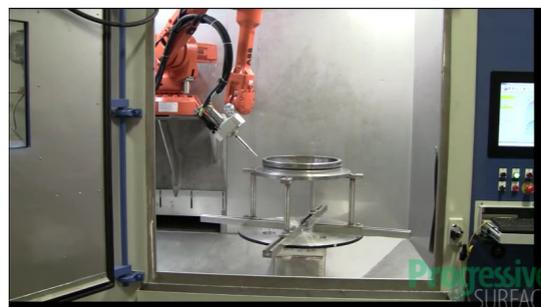


Figure 3.12 – Robot de nettoyage d'outillage de la société Progressive Surface.

C.E.B. Impianti⁶ est spécialisé dans le nettoyage des containers et cuves servant au mélange de

5. <http://progressivesurface.com/>

6. <http://www.cebimpianti.com/InfinityCEB/cms/ENG/home.html>

produits chimiques. Il propose des machines de nettoyage vertical qui lavent, rincent et sèchent des cuves, qu'elles soient ouvertes ou fermées.

Pour les cuves et réservoirs fermés, plusieurs entreprises (telles que Sani-Matic⁷ et Lechler GmbH⁸) proposent des buses de nettoyage rotatives et les sphères de pulvérisation statiques. Ces systèmes projettent de l'eau dans toutes les directions de l'espace, pendant une durée donnée, pour assurer le nettoyage complet des surfaces internes du réservoir.

3.4.4 Synthèse

Les principales technologies industrielles existantes de nettoyage sont chimiques, mécaniques ou hydrodynamiques. Actuellement une combinaison des deux premières technologies est utilisée par les opérateurs (chimique par l'utilisation du plastifiant pour fluidifier le propergol, et mécanique par l'utilisation d'outils de raclage, grattage et essuyage).

Les solutions industrielles de nettoyage de cuves ou d'autres outillages utilisent de l'eau sous pression pour décoller voire évacuer les résidus à nettoyer. Cependant pour notre application, il est préférable d'éviter d'utiliser ces technologies à base d'eau en début de nettoyage, car cela rendrait plus complexe la gestion et le traitement des déchets.

Dans les industries chimique et pétrolière, des systèmes robotiques ont été réalisés pour l'inspection de cuves et tuyaux. Peu de systèmes permettent le nettoyage des produits inflammables qui recouvrent leurs surfaces. Un robot mobile téléopéré spécifique a été conçu pour nettoyer des résidus de pétrole présents au fond de grandes cuves. Il ne permet cependant pas le nettoyage de parois verticales.

Plus généralement de nombreux systèmes robotiques ont été conçus pour nettoyer les sols, les murs, les vitres et les canalisations. Les surfaces à nettoyer étant étendues, ces robots sont très souvent mobiles. Les surfaces des cuves que nous cherchons à nettoyer n'étant pas si étendues, ce besoin de mobilité n'est pas présent. Par ailleurs, un robot mobile devrait être capable de se déplacer dans un produit visqueux et collant, et sur la paroi latérale. Il devrait ainsi naviguer sur l'ensemble des surfaces de la cuve, en respectant la contrainte de durée de nettoyage d'une heure. Le robot mobile devrait également embarquer l'ensemble des outils nécessaires pour assurer les différentes phases de nettoyage, et serait lui-même à nettoyer en fin de cycle. Pour ces différentes raisons, ce type de robot a été écarté.

Les robots et autres moyens de nettoyage présentés dans cet état de l'art ne répondent pas aux contraintes industrielles du nettoyage de cuve de propergol. Une nouvelle solution doit donc être développée. La conception d'un système cobotique en réponse au besoin industriel est présentée dans le chapitre suivant.

7. <http://sanimatic.com/sanitary-components/spray-ballssupply-tubes/>

8. http://www.lechler.de/Products/General-Industry/Tank-cleaning-nozzles/-cbeTx_AAABSNcAAAEvmYoh.E.A-en_US

Chapitre 4

Conception d'un système cobotique de nettoyage des cuves de propergol

Dans ce chapitre, nous détaillons la conception d'un système cobotique pour répondre au besoin d'amélioration du poste de nettoyage des cuves de propergol. Nous nous appuyons pour cela sur l'analyse préliminaire et sur l'état de l'art des moyens de nettoyage décrits dans le chapitre précédent. Nous avons fait évoluer la conception à travers plusieurs itérations d'élaboration d'hypothèses et de simulations impliquant les opérateurs du poste de nettoyage. Les trois itérations principales sont décrites consécutivement dans les sections 4.1, 4.2 et 4.3. Pour la dernière itération, nous avons réalisé un prototype permettant d'évaluer le système cobotique en fonctionnement proche des conditions réelles de travail. À partir des résultats obtenus avec ce prototype, nous avons travaillé avec les services internes d'ArianeGroup pour définir et chiffrer la solution finale qui pourra être implantée en Guyane pour Ariane 5 et 6. Cette dernière phase et les perspectives du projet sont présentées dans la section 4.4.

4.1 Élaboration et simulations d'un principe de solution

La conception d'un principe de solution passe par l'établissement d'hypothèses de conception sur la base de l'analyse préliminaire (ergonomique, fonctionnelle et état de l'art des technologies). Ces hypothèses de conception portent à la fois sur le système robot (sa structure, son fonctionnement), sur la tâche à réaliser, et sur la potentielle future activité de travail homme-robot. Les simulations permettent d'évaluer les hypothèses de conception pour les transformer en "choix de conception" ou les invalider [Thi98].

Dans les sections suivantes nous développons un principe de solution de système cobotique de nettoyage des cuves. Pour cela nous avons commencé par définir des hypothèses de conception dont la faisabilité industrielle a été confortée à travers des consultations de fournisseurs et d'intégrateurs spécialisés. Nous avons alors évalué ces hypothèses de conception à travers la simulation du système robot, puis à travers des simulations participatives de l'activité du système cobotique.

4.1.1 Définition des hypothèses de conception sur le système cobotique

Les premières hypothèses de conception ont été élaborées avec le groupe de travail en partant du besoin étudié, et de la connaissance des moyens de nettoyage et d'automatisation.

L'étude d'autres procédés de nettoyage n'a pas permis de faire évoluer le procédé réalisé actuellement (raclage, grattage et finition). Les étapes actuelles sont satisfaisantes d'un point de vue qualité. Nous prenons pour hypothèse qu'en conservant ces étapes, la qualité de nettoyage sera atteinte avec le futur système.

Ces opérations sont actuellement réalisées par des opérateurs qui manient les outils adaptés à chaque situation. Pour placer les opérateurs en sécurité, et les soulager des efforts et postures contraignantes, nous proposons d'utiliser un système robot qui réalisera les opérations de nettoyage, au plus proche de la cuve et du propergol. Les mouvements de nettoyage effectués actuellement par les opérateurs, sur les différentes surfaces de la cuve, sont variés et nécessitent potentiellement les 6 degrés de liberté (DDL) de l'espace. Pour répondre à cette variabilité de mouvements, nous prenons pour hypothèse que les outils devront être manipulés par un robot industriel articulé avec 6 axes ou plus, afin d'avoir suffisamment de degrés de liberté pour réaliser les trajectoires de nettoyage. La cuve étant ouverte vers le haut, le robot manipulateur pourrait être placé en montage plafond au-dessus de la cuve.

Les opérateurs devront être protégés des opérations pyrotechniques, et avoir les moyens de se représenter la situation et d'agir sur les opérations en cours. Ils pourraient ainsi superviser les opérations dans l'atelier, en vision directe derrière une vitre de protection par exemple, ou être placés dans un poste de commande à distance, avec une vision indirecte sur la tâche.

Pour évaluer la faisabilité de ces hypothèses de conception, d'un point de vue industriel, des fournisseurs et intégrateurs de robots et cobots industriels ont été consultés. Ces consultations avaient pour objectif d'avoir un regard extérieur – de la part de sociétés spécialisées ayant de l'expérience dans le développement de systèmes robots pour des applications industrielles – sur nos hypothèses de conception et sur les potentielles autres solutions industrielles pouvant répondre à notre besoin. Le second objectif de ces consultations était d'estimer les coûts associés pour orienter la recherche de financements en interne. Quatre réponses ont émergé de ces consultations :

- Pour deux d'entre elles, un robot industriel 6 axes sur portique en montage plafond au-dessus de la cuve a été proposé. Le robot pourrait prendre en charge certaines opérations telles que le raclage, le grattage et le changement d'outils. D'autres opérations telles que le contrôle visuel, le choix des cycles et la finition sont laissées à l'opérateur.
- Une réponse a porté sur la réalisation d'un cobot sur mesure pour effectuer l'opération de raclage en comanipulation, à proximité de la cuve et du propergol.
- La dernière réponse proposait d'effectuer les opérations en téléopération à retour d'effort assistée par ordinateur.

Ces réponses révèlent une diversité de solutions robotiques industrielles pouvant potentiellement répondre à notre besoin. Elles ont également alimenté la réflexion sur la protection des opérateurs durant les opérations pyrotechniques. Sur ce poste, les opérations présentent un risque faible d'incident pyrotechnique, du fait de l'état pâteux du produit, mais le risque n'est pas nul. Il a été décidé d'éloigner les opérateurs de la zone de travail du robot qui constitue une zone de danger durant les opérations pyrotechniques. Ainsi, nous avons exclu la possibilité d'avoir les opérateurs dans l'atelier pour superviser les opérations pyrotechniques en vision directe, même derrière une vitre de protection.

Ces échanges nous ont permis de conforter nos hypothèses de conception qui sont les suivantes :

- Les étapes de nettoyage futures sont comparables aux étapes actuelles (raclage, grattage, finition).
- Un robot industriel articulé avec 6 axes ou plus, positionné au-dessus de la cuve en position plafond, permet de réaliser des opérations de nettoyage. Des outils comparables aux outils actuels sont placés au niveau de son effecteur. Pour récupérer les informations visuelles et de force, des caméras et un capteur d'effort sont utilisés.
- Pendant les opérations de nettoyage du propergol, les opérateurs sont placés dans un poste de commande à distance. Ils ont les moyens de se représenter la situation, et de commander les opérations, en supervision ou en téléopération. Pour cela ils disposent de retours visuels sur les opérations et de retours sur les efforts exercés par le robot.

Ces hypothèses globales sur le système cobotique sont illustrées sur la figure 4.1, à partir du modèle défini dans la section 2.2.4.

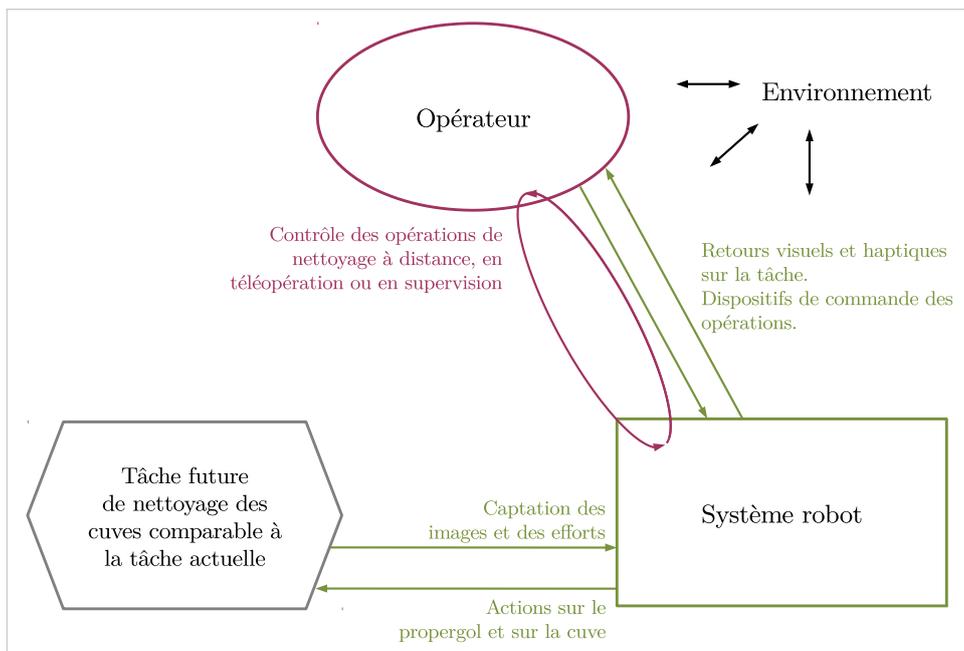


Figure 4.1 – Visualisation des premières hypothèses de conception sur le système cobotique de nettoyage des cuves.

Dans cette adaptation du modèle de système cobotique nous n'avons pas placé de boucle directe de "perception/action" entre l'opérateur et la tâche puisque nous prenons pour hypothèse que les opérations sont effectuées à distance. Ainsi l'opérateur réalise son activité à travers le système robot. Ce modèle met en valeur l'importance de la prise en compte des besoins des opérateurs dans la conception du système robot. En effet, ce dernier doit laisser la marge de manœuvre aux opérateurs pour réguler les variabilités industrielles et doit s'adapter aux variabilités inter- et intra-opérateur (voir section 2.1.4.3). La partie des hypothèses sur le système robot sont détaillées sur la figure 4.2, en exploitant le modèle que nous avons défini dans la section 2.1.3.

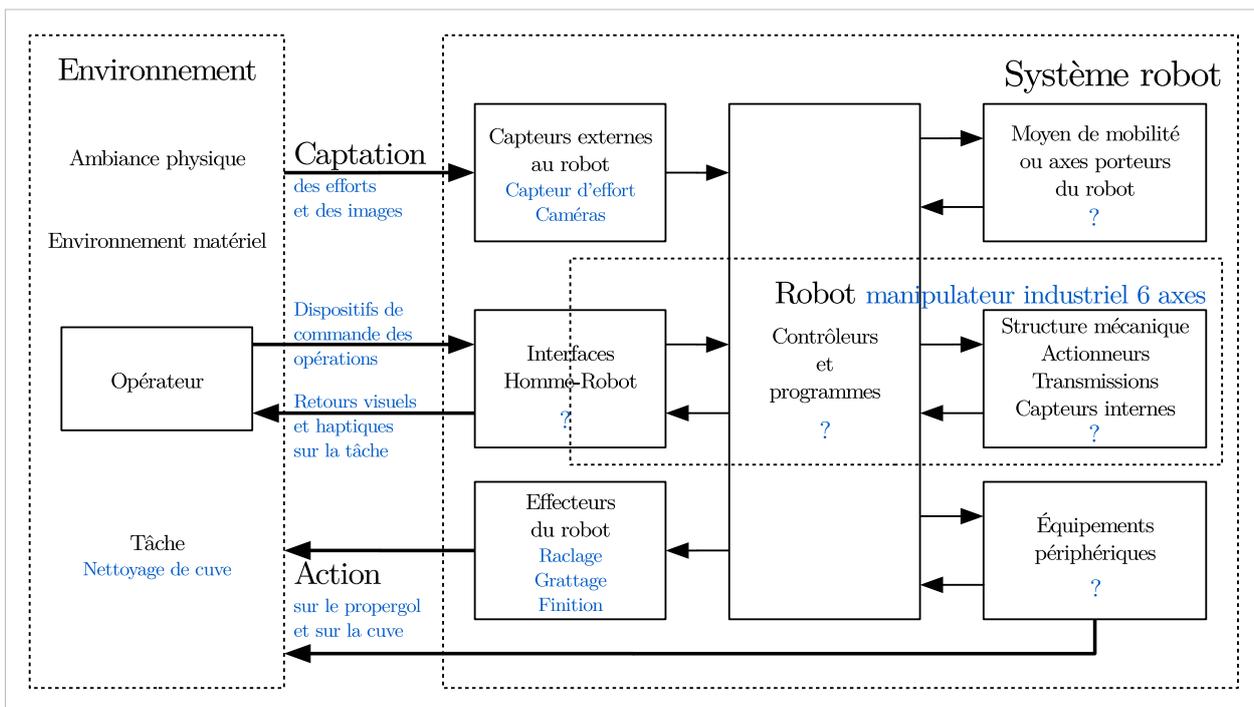


Figure 4.2 – Détail des hypothèses de conception sur le système robot de nettoyage des cuves. En noir, le modèle de base et, en bleu, les hypothèses de conception. Les "?" représentent les éléments qui restent à déterminer.

Notons que dans ce modèle l'"Environnement" représente tout ce qui est extérieur au robot, cependant l'opérateur peut ne pas être dans le même environnement physique que la tâche. C'est notre cas, où nous considérons un système robot dans l'atelier de nettoyage des cuves et les opérateurs pouvant être à distance dans un poste de commande.

Pour que l'opérateur puisse réaliser la tâche de nettoyage des cuves à travers le système robot, ce dernier doit capter les informations déterminantes de la tâche et les retourner aux opérateurs. Notre analyse de l'activité des opérateurs a mis en valeur l'expertise visuelle des opérateurs et le besoin de contrôler les efforts du nettoyage. Les capteurs du système robot devront donc comprendre un capteur d'effort et des caméras. Nous avons considéré que les étapes du nettoyage avec le système cobotique seront comparable aux étapes actuellement réalisées par les opérateurs. Ainsi nous avons pris pour hypothèse que le système robot comprendrait des effecteurs de raclage, grattage et finition similaires aux outils actuels des opérateurs. Enfin, pour permettre une variété de trajectoires des outils sur les surfaces de la cuve et pour faire face aux variabilités, nous nous orientons actuellement vers un robot industriel articulé 6 axes. À ce stade, nous n'avons pas formulé d'hypothèse sur les autres éléments du système robot, tels que les interfaces homme-robot ou la structure mécanique précise, qui restent à déterminer.

Nous avons proposé dans la section 2.3.4 d'utiliser la formalisation de l'analyse préliminaire par sous-tâche pour détailler les hypothèses de conception. Cette proposition est reprise sur la figure 4.3.

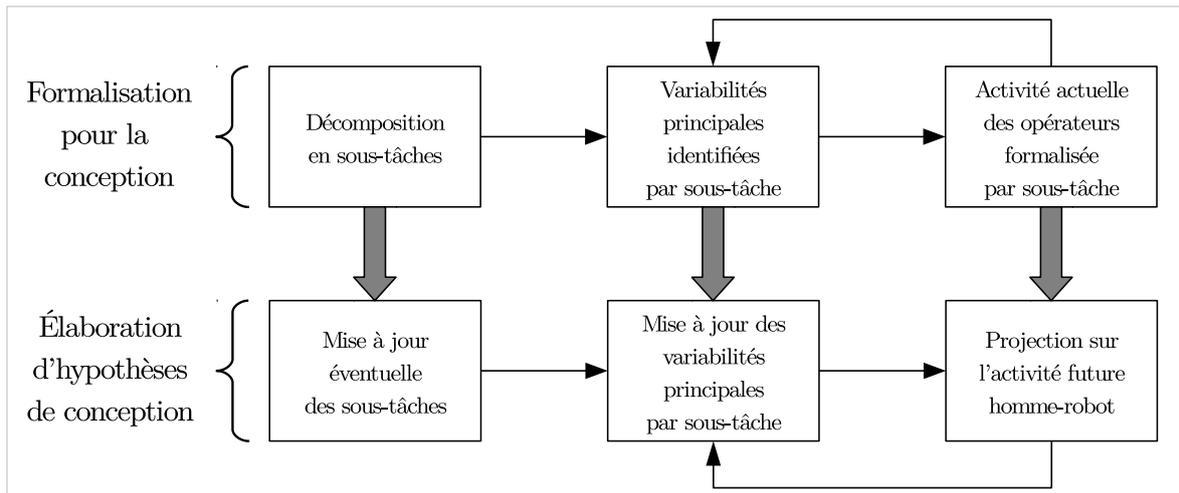


Figure 4.3 – Approche pour l'élaboration d'hypothèses de conception sur le système cobotique, en s'appuyant sur la formalisation de l'analyse préliminaire.

Nous sommes ainsi reparti du tableau 3.4 qui synthétise l'activité de travail des opérateurs par sous-tâche, pour émettre des hypothèses plus détaillées sur l'activité future de l'homme et du robot dans le système cobotique. Cette proposition d'activité homme-robot, pour chaque sous-tâche, est synthétisée dans le tableau 4.1.

Tâche	Activité actuelle des opérateurs	Proposition d'activité future homme-robot
Choix et changement de raclette	Choisir et prendre la raclette appropriée	L'opérateur sélectionne la raclette appropriée, le robot effectue le changement automatiquement
Raclage	Adapter les trajectoires et efforts de raclage	Le robot effectue des cycles automatiques, l'opérateur supervise et peut changer les paramètres du nettoyage si besoin.
Pulvérisation plastifiant et grattage	Adapter les trajectoires et efforts de grattage	Le robot effectue des cycles automatiques, l'opérateur supervise et peut changer les paramètres ou passer en téléopération si besoin.
Finition aux chiffons	Adapter les trajectoires et efforts de nettoyage	L'opérateur téléopère le robot pour nettoyer les résidus.
Changement de chiffon	Décider suivant l'efficacité du nettoyage	L'opérateur décide des changements de chiffon et le robot effectue le changement automatiquement.
Contrôle de la qualité	Inspection visuelle ou tactile	L'opérateur effectue l'inspection grâce à des retours visuels ou tactiles.

Tableau 4.1 – Proposition d'activité future pour le système cobotique, pour les sous-tâches principales du nettoyage des cuves, sur la base de l'activité actuelle.

Dans cette proposition, nous prenons pour hypothèse que la majeure partie du propergol peut être raclée par le robot en effectuant des trajectoires simples. En fonction des déterminants du produit (quantité, viscosité, sensibilité), l'efficacité du nettoyage pourrait être optimisée en modifiant certains paramètres tels que les vitesses, efforts et angles de raclage. L'opérateur, ayant l'expérience du nettoyage du produit, pourrait adapter ces paramètres, voire changer de raclette, suivant la qualité de nettoyage observée. À chaque étape, l'opérateur a la possibilité d'évaluer la qualité du nettoyage, que ce soit en supervision ou en téléopération. Cette proposition de répartition des rôles entre l'homme et le robot laisse aux opérateurs l'expertise en perception et en décision. La gestion des situations de variabilité par l'opérateur est permise par le mode téléopération.

En fonction des résidus de propergol restants après le raclage, le nettoyage nécessite plus ou moins de plastifiant, et les trajectoires et efforts de grattage doivent être adaptés. Une partie du grattage pourrait être effectuée par le robot suivant des cycles automatiques (pré-programmés). Selon l'efficacité des cycles, l'opérateur pourrait décider de changer les paramètres de nettoyage et poursuivre les cycles automatiques, ou de prendre la main en téléopération si des stratégies plus complexes sont nécessaires.

Lors de l'étape de finition, les opérateurs essuient les traces de propergol avec un chiffon et contrôlent la qualité finale du nettoyage en même temps de manière visuelle ou tactile. En fonction de la quantité et de la pégosité des résidus, ils adaptent la trajectoire, la durée et les efforts de frottement, et la durée d'utilisation d'un chiffon. La réalisation de la finition aux chiffons étant étroitement liée à l'inspection de la qualité de nettoyage, nous avons considéré qu'il serait compliqué d'effectuer cette étape par des cycles pré-programmés à cause des fortes variabilités. L'opérateur pourrait téléopérer le robot pour nettoyer les résidus et réaliser l'inspection en même temps à l'aide de retours visuels ou tactiles. Lorsqu'il décide de changer de chiffon, ce changement pourrait être effectué automatiquement par le robot.

Ces hypothèses de conception sont évaluées par des simulations dans la suite.

4.1.2 Simulation du système robot

L'objectif de nos simulations est double :

- Dimensionner et évaluer en partie la structure du système robot : topologie, dimensions, encombrement, implantation dans les locaux, accessibilité des zones de travail.
- Conduire des simulations avec les opérateurs pour se projeter sur la potentielle activité future : enchaînement des tâches et rôles homme/robot, fonctionnement du système robot, marge de manœuvre laissée aux opérateurs pour gérer les situations de variabilité.

Dans la section 4.1.2.1, nous décrivons le choix d'un logiciel de simulation permettant de répondre aux deux objectifs. Dans la section 4.1.2.2 nous nous intéressons en particulier au premier objectif. Le second est traité par la suite, dans la section 4.1.3.

4.1.2.1 Choix d'un logiciel de simulation robotique

Afin de simuler la structure et le fonctionnement du système robot, et son intégration dans l'atelier, une comparaison des logiciels de simulation robotique a été réalisée. La plupart des simulateurs de robots proposent des fonctions pour programmer les mouvements des robots, calculer les cinématiques inverses, détecter les collisions, gérer les capteurs et effecteurs. Nos critères de sélection portaient sur ces éléments ainsi que sur l'intégration des fonctionnalités suivantes :

- (a) Bibliothèque de robots industriels : pour évaluer aisément différentes structures de robots.
- (b) Bibliothèque d'objets divers : pour accélérer la modélisation de l'atelier.
- (c) Création de formes : pour modéliser des objets simples sans passer par un logiciel de CAO.
- (d) API¹ externe : pour contrôler la simulation à travers des interfaces externes (voir section 4.2).
- (e) Mannequins virtuels : pour modéliser des opérateurs et leur activité pour les simulations participatives.

À la disponibilité de ces fonctionnalités dans le logiciel de simulation robotique, s'ajoute le critère suivant :

- (f) Coût d'achat : inférieur à 1000 euros pour une licence annuelle.

Nous avons comparé sur ces critères les logiciels de simulation robotique suivants : Actin², Gazebo [KH04], RoboDK³, V-REP [RSF13] et Webots [Mic04].

D'autres logiciels de simulation robotique sont répandus dans les entreprises qui possèdent de nombreux robots industriels. Ils permettent la simulations de moyens de production, de procédés industriels et la programmation hors-ligne des robots industriels. Nous pouvons les regrouper sous deux catégories :

- Les logiciels de PHL vendus par les constructeurs de robots industriels, tels que RobotStudio d'ABB, Roboguide de Fanuc et KUKA Sim de Kuka. Leurs bibliothèques de robot sont spécifiques à chaque constructeur. Nous les regrouperons sous le terme "PHL constructeur".
- Les logiciels tels que Process Simulate de Siemens et DELMIA de Dassault qui permettent la simulation de toutes les marques de robots. Nous les regrouperons sous le terme "PHL industrie".

Le tableau 4.2 synthétise l'évaluation des logiciels sélectionnés selon les critères définis précédemment.

Critères	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Actin	✓					✓
Gazebo		✓	✓	✓		✓
"PHL constructeur"	✓	✓	✓		✓	
"PHL industrie"	✓	✓	✓		✓	
RoboDK	✓			✓		✓
V-REP	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Webots		✓	✓	✓		✓

Tableau 4.2 – Comparaison de différents logiciels de simulation robotique. Une coche (✓) indique que le logiciel listé en ligne répond au critère placé en colonne. Ce tableau montre que V-REP est le seul logiciel évalué qui répond à l'ensemble des critères que nous avons définis précédemment.

1. Interface de programmation applicative (Application Programming Interface – API)
 2. <http://www.energid.com/software/actin-simulation/>
 3. <https://robodk.com/>

Les logiciels Actin, Gazebo, RoboDK et Webots n'ont pas été retenus, bien qu'ils rentrent dans notre critère de coût, car ils offrent des fonctionnalités limitées. Actin et RoboDK permettent la programmation hors-ligne des robots et ils possèdent ainsi une bibliothèque de robots industriels. Cependant ils ne possèdent pas de fonctionnalités pour modéliser rapidement des formes, des ateliers, ni les opérateurs et leur activité. Gazebo et Webots sont des logiciels visant plutôt les milieux académiques et de recherche. Ils ne possèdent pas de bibliothèque de robots industriels. Ils ne permettent pas non plus de modéliser l'activité des opérateurs à l'aide de mannequins virtuels.

Les logiciels "PHL industrie" ont l'avantage de posséder des bibliothèques très complètes de robots industriels. Cependant, leurs caractéristiques et leur coût les dédient plutôt à la conception de lignes de production complètes ou à la programmation d'un parc conséquent de robots industriels. Par ailleurs ce sont des environnements de développement intégrés qui ne permettent généralement pas de contrôler la simulation à travers des interfaces externes. Ils ne sont donc pas adaptés à notre besoin. Les logiciels "PHL constructeur" n'ont pas été retenus car ils possèdent les mêmes défauts. Même s'ils sont généralement moins coûteux que les "PHL industrie", leur prix (de l'ordre de plusieurs milliers d'euros pour une licence annuelle) reste élevé au regard de notre besoin.

V-REP a ainsi été choisi car il est le seul à répondre à l'ensemble de nos critères parmi les logiciels évalués. Ils possède de base une bibliothèque de robots variés dont des robots industriels. Bien que limitée, cette base peut être étendue en important des modèles de robot ou en recréant un modèle de robot avec ses segments, articulations, capteurs et effecteurs. Une bibliothèque d'objets (tels que des murs, tables, barrières, escalier, sols, portes ou fenêtres) permet de modéliser rapidement un atelier simplifié. Il est possible de créer de nouveaux objets comme combinaison de formes géométriques 3D de base (sphérique, cubique, cylindrique, conique) et en éditant directement les points qui composent la surface d'un objet. V-REP intègre également différents modèles de mannequin virtuels avec des postures et comportements pré-programmés (position fixe, mouvement de travail, marche suivant une trajectoire, planification de trajectoire) et facilement modifiables. V-REP combine un large choix de moyens pour contrôler la simulation : scripts embarqués, "plugins"⁴, API externe et "ROS node"⁵. Enfin, V-REP peut-être utilisé gratuitement pour un usage non commercial.

4.1.2.2 Simulations du système proposé

V-REP a d'abord été utilisé pour modéliser de manière simplifiée l'atelier de nettoyage des cuves. La figure 4.4 illustre cette modélisation avec une cuve à poste.

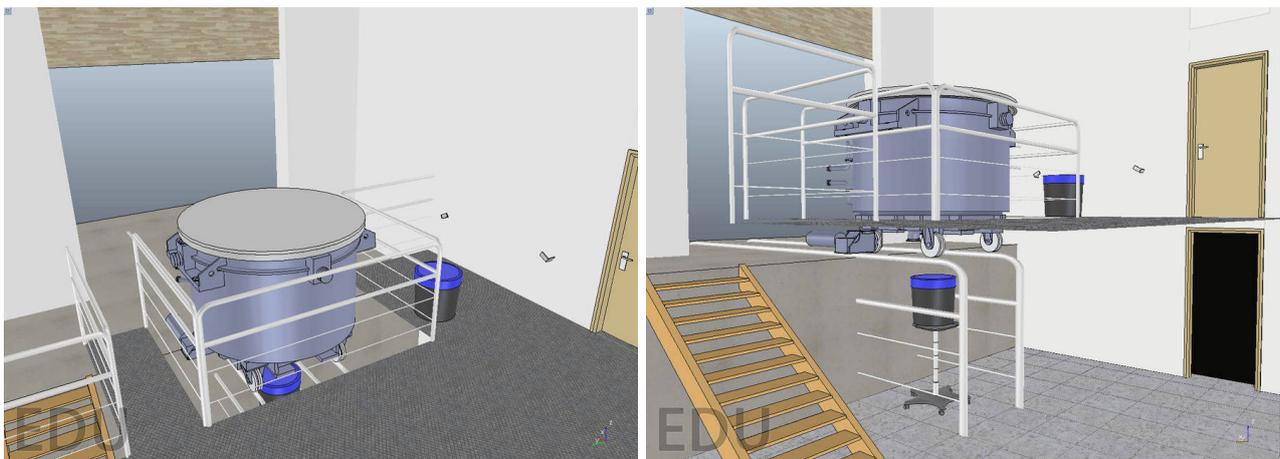


Figure 4.4 – Modèle réalisé avec V-REP de l'atelier de nettoyage des cuves : vue du premier étage à gauche et vue latérale des deux étages à droite.

4. Modules complémentaires informatique.

5. Processus réalisant des calculs, pouvant communiquer avec les autres "nodes" (nœuds) du système d'exploitation pour robot ROS (Robot Operating System).

Ce modèle simplifié a servi de base pour étudier l'intégration du système robot dans l'atelier. Le modèle de la cuve est géométriquement fidèle à la cuve réelle.

V-REP contient une bibliothèque de plusieurs modèles de robots industriels. Afin d'étudier l'accessibilité des robots aux surfaces internes de la cuve, des effecteurs simplifiés de raclage et de finition ont été modélisés sous V-REP. Nous avons pris pour hypothèse de placer le robot manipulateur en position plafond au-dessus de la cuve pour faciliter son accessibilité aux zones de nettoyage et réduire la portée nécessaire. Pour permettre le passage de la cuve lorsque le robot est en position de garage, et pour mettre en place le robot dans la cuve, il est placé sur un axe additionnel vertical.

Une étude d'accessibilité a été réalisée avec différents modèles de robot industriels disponibles dans V-REP, selon cette configuration. Un premier filtrage des robots a été réalisé en comparant leur enveloppe au modèle géométrique de la cuve. Des trajectoires d'outils parcourant la virole et le fond de la cuve ont été programmées et testées sur les robots sélectionnés, pour valider leur accessibilité et pour évaluer la présence de singularités sur ces trajectoires. Cette étude a montré qu'un robot manipulateur 6 axes d'une portée de 1,30 m, tel que le modèle UR10 du constructeur Universal Robots, placé sur un axe additionnel vertical, suffit à atteindre l'ensemble des surfaces internes de la cuve (voir figure 4.5).

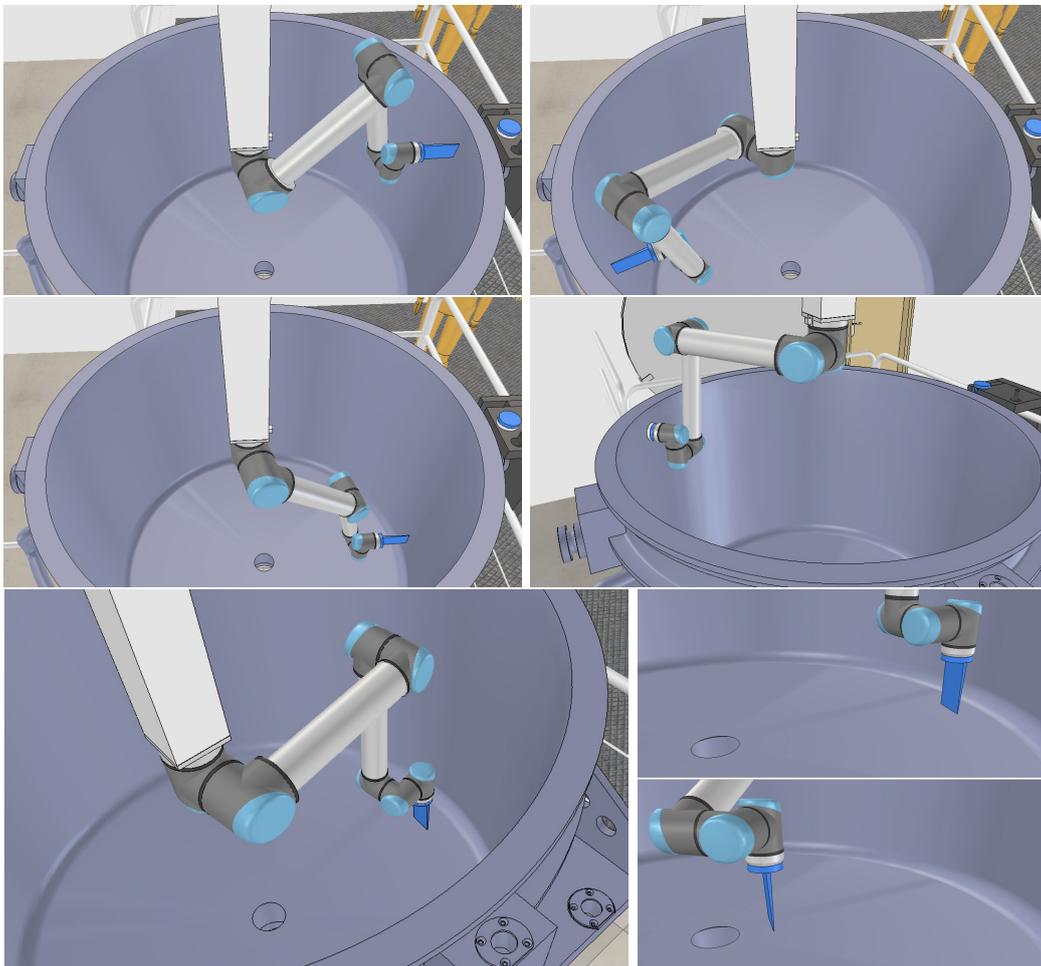


Figure 4.5 – Accessibilité des outils de nettoyage aux surfaces intérieures de la cuve, avec un UR10 placé sur un axe additionnel vertical.

À ce stade du projet, l'objectif était de définir un principe de solution correspondant aux hypothèses de solutions, afin de présenter au plus tôt le concept aux opérateurs, et réaliser de premières simulations participatives. Nous n'avons pas cherché ici à optimiser la structure et les dimensions du système robot.

4.1.3 Simulation participative de l'activité future du système cobotique

La conduite de simulations avec les opérateurs vise à analyser leur potentielle future activité, en les confrontant aux situations envisagées. Elle permet d'évaluer le fonctionnement du système cobotique conçu, face aux situations de travail et aux variabilités mises en valeur par l'analyse de l'activité.

Nous avons construit un scénario pour décrire les situations de travail et les séquences d'actions du système cobotique conçu, afin d'évaluer le principe de solution avec les opérateurs du poste de nettoyage des cuves de Saint-Médard. Le modèle numérique ayant servi aux simulations précédentes est utilisé comme support aux simulations participatives, pour aider les opérateurs à visualiser les actions et à se projeter dans les situations. Il a été animé, suivant le scénario, pour illustrer les phases de fonctionnement décrites, de l'arrivée de la cuve jusqu'à son départ. Les mouvements du robot, des axes porteurs, de la cuve et des opérateurs ont été implémentés dans V-REP à l'aide de "child scripts"⁶. Ce support de simulation est résumé à l'aide de notre modèle de système robot sur la figure 4.6.

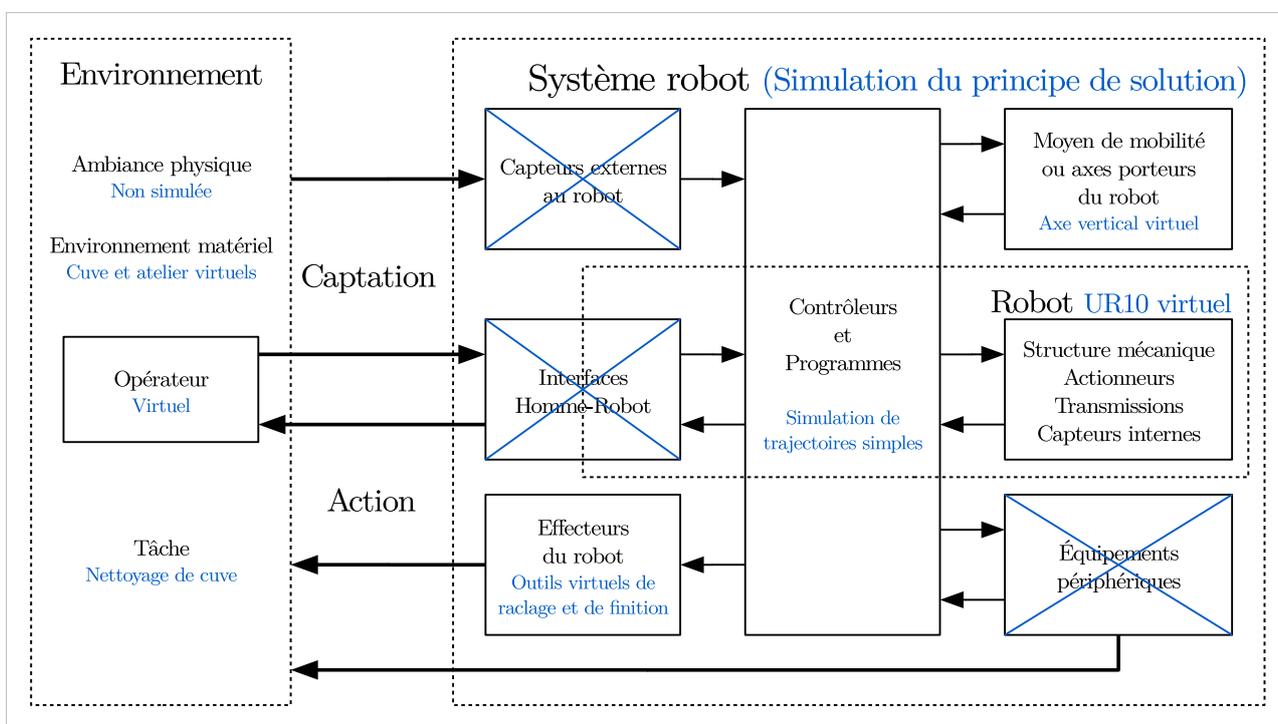


Figure 4.6 – Simulation du système robot de nettoyage des cuves et de son environnement. En noir, le modèle de base et, en bleu, les éléments simulés.

Dans ces premières simulations participatives, nous n'avons pas simulé les interactions du système robot avec les opérateurs. Les capteurs externes, interfaces homme-robot et équipements périphériques n'ont pas été intégrés dans cette simulation. Nous avons simulé le changement d'outil, le retrait du couvercle et le déplacement de l'outil sur les parois de la cuve, comme illustré sur le scénario présenté ci-après.

Pour construire le scénario, nous nous sommes appuyés sur l'analyse de l'activité actuelle et sur la proposition d'activité future homme-robot, synthétisés dans le tableau 4.1. Pour chaque étape du scénario nous avons préparé des questions, posées aux opérateurs durant les simulations participatives, pour évaluer les futures situations de travail et le système cobotique. Le scénario suivant a ainsi été présenté aux opérateurs comme support aux simulations participatives, des extraits des questions posées étant mis en italique :

6. "Scripts enfants" rattachés aux objets de la scène virtuelle, dans lesquels sont programmés, en langage Lua, les comportements des objets de la simulation dans V-REP.

	<p>Les opérateurs préparent l'atelier. Le robot est en position de garage, la puissance coupée. <i>Le robot ne gêne-t-il pas durant la préparation de l'atelier ?</i></p>
	<p>La cuve est mise sur les rails par un cariste à l'extérieur de l'atelier. Elle est acheminée à poste jusqu'en butée des rails. <i>Peut-on envisager que l'acheminement soit réalisé automatiquement ? Le robot ne gêne-t-il pas durant le déplacement de la cuve ?</i></p>
	<p>Le couvercle est retiré de la cuve et déposé contre un mur de l'atelier, par le robot. L'opérateur supervise cette opération à distance. <i>Y a-t-il un intérêt à ce que le robot prenne en charge cette opération ?</i></p>
	<p>Le propergol situé au-dessus de la vanne en fond de cuve est dégagé avec une raclette, par le robot. L'opérateur supervise cette opération à distance. <i>Y a-t-il un intérêt à ce que le robot prenne en charge cette opération ?</i></p>
	<p>Les opérateurs extraient la vanne à distance. L'un l'amène dans un autre local pour réaliser son nettoyage. L'autre opérateur met une poubelle sous l'orifice de la cuve et va dans un poste de commande pour réaliser le nettoyage du reste de la cuve à distance. <i>Ces opérations sont-elles impactées par la présence du robot ?</i></p>
	<p>L'opérateur démarre le robot, sélectionne le matériau de la raclette adapté à la composition chimique du propergol à nettoyer, et lance un cycle automatique de raglage en supervision. <i>Quelle est la nature des retours d'informations dont vous avez besoin pour cette opération ? Y a-t-il des situations dans lesquelles un cycle automatique risque de ne pas marcher ?</i></p>
	<p>L'opérateur demande au robot de déposer la raclette et de prendre les outils de pulvérisation du plastifiant et de grattage. Il lance un cycle automatique de pulvérisation du plastifiant sur les résidus de propergol, puis un cycle de grattage en supervision. En fonction de la quantité de traces restantes, l'opérateur peut changer les paramètres du nettoyage et relancer un cycle sur les zones ciblées, ou passer en téléopération. <i>Quelle est la nature des retours d'informations dont vous avez besoin pour cette opération ? Y a-t-il des situations dans lesquelles un cycle automatique risque de ne pas marcher ? Quelle marge de manœuvre doit vous laisser le système pour assurer ces opérations ?</i></p>

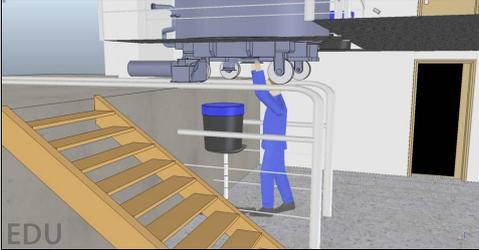
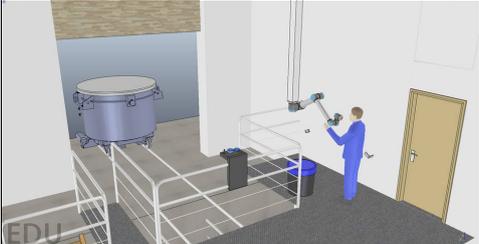
	<p>L'opérateur demande au robot de déposer les outils de grattage et de pulvérisation pour prendre l'outil de nettoyage au chiffon. Il téléopère le robot pour réaliser la finition. Lorsque le chiffon est sale, il commande au robot de le changer.</p> <p><i>Quelle est la nature des retours d'informations dont vous avez besoin pour cette opération ? Quelle marge de manœuvre doit vous laisser le système pour assurer ces opérations ?</i></p>
	<p>L'opérateur commande la mise en position garage du robot et coupe la puissance. Il retourne dans l'atelier, sort les poubelles de déchets pyrotechnique, prend une poubelle vide et nettoie les outillages sous la cuve.</p> <p><i>Ces opérations sont-elles impactées par la présence du robot ?</i></p>
	<p>L'opérateur ayant fini de nettoyer la vanne dans un autre local, la positionne sous la cuve. Les opérateurs remontent la vanne propre à distance et vérifient son fonctionnement à vide. Le couvercle est remis sur la cuve, qui est acheminée hors de l'atelier.</p> <p><i>Ces opérations sont-elles impactées par la présence du robot ? Y a-t-il un intérêt à ce que le robot prenne en charge la remise du couvercle ?</i></p>
	<p>Les opérateurs nettoient les outils du robot, jettent les consommables tels que les chiffons sales et vérifient l'état des stocks. Si le robot est sale, ils le nettoient également. En fin de campagne de coulée, ils nettoient l'atelier.</p> <p><i>Comment positionner le robot pour faciliter son nettoyage ? Où placer le robot pour qu'il ne gêne pas durant le nettoyage de l'atelier ?</i></p>

Tableau 4.3 – Scénario servant de support aux simulations participatives de l'activité future du système cobotique. À gauche, des images extraites de la simulation numérique à chaque étape principale. À droite, une description sommaire de l'activité, avec les questions posées aux opérateurs en italique.

Les simulations participatives ont été conduites avec 9 opérateurs au total. Chaque simulation était réalisée avec un groupe restreint d'opérateurs pour favoriser l'expression de chacun, et pour leur permettre de discuter les pratiques et stratégies pouvant varier entre eux. Nous avons effectué trois simulations participatives, avec entre 2 et 4 opérateurs à chaque passage.

Lors de chaque passage, les objectifs de la simulation participative et la solution proposée étaient d'abord présentés aux opérateurs. La simulation était ensuite conduite suivant le scénario, en lançant l'animation du modèle numérique pour illustrer les situations de travail envisagées. Au fur et à mesure, nous décrivions les rôles de l'homme et du robot aux opérateurs, et leur posions les questions associées. Tout au long de la simulation, les opérateurs pouvaient librement poser des questions, et donner leur avis sur le système proposé et sur la représentativité de la simulation. En complément du scénario, les questions suivantes ont été abordées avec les opérateurs pour évaluer la solution proposée :

- Y a-t-il des situations de travail qui ne sont pas décrites dans cette simulation ?
- Le système proposé vous semble-t-il adapté à vos besoins et aux tâches à réaliser ?
- Quels avantages et inconvénients voyez-vous à cette collaboration avec le robot, comparé à votre activité actuelle ?
- Souhaiteriez-vous travailler avec un tel système ?
- Avez-vous des suggestions pour améliorer la solution proposée ?

Finalement, le scénario était déroulé une seconde fois avec les mêmes opérateurs, en relançant

l'animation du modèle numérique, pour collecter d'autres avis éclairés. La durée totale de chaque simulation participative était d'environ 20 minutes.

À l'issue des simulations participatives, différents résultats qualitatifs se sont dégagés. Certains correspondent aux réponses apportées par les opérateurs aux questions préparées et d'autres sont issus des discussions libres. Ils sont résumés par étape du scénario dans le tableau suivant :

<p>Préparation de l'atelier Dans la configuration proposée, le système robot ne gêne pas les opérateurs durant la préparation de l'atelier.</p>
<p>Mise à poste de la cuve L'acheminement de la cuve est une opération de courte durée et non contraignante. L'opérateur relie un flexible branché sur le réseau pneumatique à l'entrée d'air des moteurs pneumatiques de la cuve, appuie sur un bouton pour la faire avancer jusqu'en butée et retire le flexible. Il n'y a pas d'intérêt à automatiser cette opération car l'analyse ne met pas en valeur de risque pour la santé pour l'homme et car cette opération simple pour l'homme rendrait le système robot plus complexe et coûteux à développer et à intégrer. Dans la configuration proposée, lorsque l'axe vertical du système robot est en position haute, le robot n'est pas sur la trajectoire de la cuve durant son déplacement sur les rails.</p>
<p>Retrait du couvercle Le couvercle n'est pas très lourd (environ 8 kg). C'est plus son encombrement qui est contraignant, mais à deux personnes l'opération ne pose pas de problème. Avec le robot cela prendrait plus de temps car les opérateurs devraient sortir de l'atelier pour le mettre sous puissance et lancer son exécution. Or, ils devraient ensuite arrêter le robot pour revenir dans l'atelier pour les opérations suivantes. Il n'est donc pas pertinent de réaliser cette opération avec le robot car il y aurait une perte temps de cycle et car les risques dorso-lombaires de manutention manuelle sont faibles.</p>
<p>Dégagement de la vanne De même, le retrait du propergol situé sur la vanne en fond de cuve est une opération rapide qui ne pose pas de problème aux opérateurs. L'opération prendrait plus de temps avec le robot, pour les mêmes raisons que pour le retrait du couvercle. Cette opération pourra être réalisée par un opérateur lorsque le robot est en position de garage.</p>
<p>Extraction et nettoyage de la vanne L'extraction et le nettoyage de la vanne ne sont pas pris en charge par le système robot proposé. Ces opérations sont réalisées au rez-de-chaussée de l'atelier et dans un autre local, elles ne sont pas impactées par l'introduction du système robot au premier étage.</p>
<p>Raclage de la cuve Les opérateurs ont besoin d'inspecter l'état global de propreté de la cuve, comment se comporte le propergol en cours de raclage et la qualité du nettoyage de la zone traitée. Ils doivent également connaître l'état de remplissage de la poubelle placée sous la cuve, pour la changer lorsqu'elle est pleine. Une vision globale de l'atelier est nécessaire pour s'assurer que personne n'y est présent durant les opérations pyrotechniques et pour contrôler les mises en position du robot. Les opérateurs ont également besoin de retours sonores, car cela leur permet de détecter au plus tôt une prise en feu du propergol, afin d'intervenir rapidement en cas d'incident. La viscosité et la pégosité du propergol varient en fonction de sa composition chimique, de sa température et de la durée entre la fin de la coulée et l'arrivée de la cuve au poste de nettoyage. Le système devra pouvoir s'adapter à ces variabilités. Dans certains cas où le propergol est très visqueux, les opérateurs ont des difficultés à nettoyer la cuve. Ces difficultés sont accentuées avec certaines compositions dont la pégosité est élevée. Ces variations peuvent amener des difficultés en cas de cycles automatiques.</p>
<p>Grattage De même que pour le raclage, les opérateurs ont besoin d'inspecter l'état global de propreté de la cuve et de contrôler en temps réel l'efficacité locale du grattage. Ils doivent pouvoir vérifier l'état de l'éponge abrasive utilisée et la changer, car lorsqu'elle est saturée de propergol l'efficacité du nettoyage diminue. La vision de l'atelier, du remplissage de la poubelle et les retours sonores sont également nécessaires durant cette opération. Lors de cette étape, la pulvérisation du plastifiant permet de fluidifier le propergol, ce qui le rend moins visqueux et moins pégueux. La principale difficulté réside dans la maîtrise des trajectoires pour ne pas étaler sur le reste de la cuve le propergol détaché et pour permettre l'évacuation des effluents. Le système doit permettre aux opérateurs de réguler les trajectoires de grattage et d'évacuation des effluents, dont les variabilités peuvent être difficiles à prendre en charge par des cycles automatiques.</p>
<p>Finition L'opération de finition nécessite d'avoir conscience en temps réel des traces restantes dans la cuve, pour concentrer le nettoyage au chiffon sur ces zones et être plus efficace. La détection des traces de propergol sur la cuve est complexe car sujette à de nombreuses variabilités (couleur du propergol, quantité de produit, luminosité ambiante, éclairages, état de surface de la cuve, et présence de plastifiant notamment). L'opérateur a une expertise dans l'inspection de la cuve et dans la régulation de ses gestes de nettoyage. Le système doit lui permettre d'inspecter l'ensemble de la cuve en adaptant la proximité et l'orientation de la vue par rapport à la surface de la cuve. L'opérateur doit également pouvoir adapter les mouvements et efforts de nettoyage.</p>

<p>Nettoyage des outillages sous cuve</p> <p>Durant ces opérations réalisées au rez-de-chaussée, le robot est à l'arrêt au premier étage du local. Le système robot n'a donc pas d'incidence sur ces opérations.</p>
<p>Remontage de la vanne, remise du couvercle et départ de la cuve</p> <p>La présence du système robot n'a pas d'impact sur l'opération de remise de la vanne. Lorsque l'axe vertical du système robot est en position haute, la cuve peut être acheminée hors de l'atelier sans gêne. Comme évoqué précédemment, la prise en charge du couvercle par le système robot nécessiterait que les opérateurs sortent de l'atelier le temps que le robot effectue son cycle. Cette opération étant actuellement rapide et peu contraignante, il n'est pas intéressant qu'elle soit réalisée avec le robot.</p>
<p>Nettoyage du robot, des outils et de l'atelier</p> <p>Lorsque le robot est placé au-dessus de l'emplacement de la cuve, le nettoyage de l'atelier, des outils et la gestion des consommables peuvent être réalisés sans gêne. Cependant, dans cette position, il serait difficile d'accéder au robot pour le nettoyer ou pour sa maintenance car des barrières de sécurité protègent l'accès à cette zone dans l'atelier existant. Au premier étage du local, une zone située entre l'emplacement de la cuve et un mur de l'atelier sert actuellement au stockage d'outillages et des consommables. Le robot pourrait y être positionné pour qu'il soit facilement accessible au nettoyage et à la maintenance, une fois sa puissance coupée. Pour cela, un second axe porteur horizontal serait nécessaire.</p>

Tableau 4.4 – Résultats principaux des simulations participatives, synthétisés par étape du scénario.

En complément, les résultats suivants ont été collectés :

- Les opérateurs ont remarqué que certaines situations moins habituelles n'étaient pas décrites par la simulation. Il arrive que le couvercle et les parois extérieures de la cuve soient légèrement sale, auquel cas ils passent un coup de chiffon. Après discussions avec eux, le système proposé ne semble pas gêner ces opérations.
- Les opérateurs ont trouvé le système adapté à la plupart de leurs besoins et des tâches à réaliser. Ils auraient cependant aimé que le système puisse les aider dans le nettoyage des outillages sous la cuve, pour lequel les postures sont contraignantes. Cette opération nécessite un accès par le bas de la cuve et de faire passer les outils à travers des conduits étroits. Le système proposé ne permet pas de prendre en charge cette opération. Un autre projet a été lancé en interne pour améliorer le procédé actuel.
- Les avantages principaux perçus par les opérateurs pour la solution présentée concernent la réduction des efforts et l'amélioration des postures. Certains ont des craintes sur la transformation du travail pour lequel ils maîtrisent actuellement les opérations et où ils pourraient perdre en maîtrise et en efficacité.
- La plupart des opérateurs ne sont pas fermés à travailler avec un tel système s'il améliore réellement les conditions de travail et s'il n'augmente pas la durée des opérations.
- À ce stade, les opérateurs n'avaient pas de suggestion pour améliorer la solution proposée.

4.1.4 Synthèse des résultats pour la conception

Les simulations du système robot, ont montré qu'un robot manipulateur 6 axes avec une portée de 1,30 m, placé sur un axe linéaire vertical, peut accéder à l'ensemble des surfaces internes de la cuve. Un axe additionnel horizontal permettrait de placer le robot en position de garage, lorsqu'il n'est pas en fonctionnement, et dans une position facilement accessible par des personnes pour son nettoyage et sa maintenance.

Les simulations participatives ont mis en valeur les éléments suivants :

- Les opérations sur lesquelles le système robot pourrait intervenir vont du raclage de la cuve (après extraction de la vanne), jusqu'à la finition (avant nettoyage des outillages sous cuve).
- Pour réaliser ces opérations, l'opérateur commande le système robot à distance, avec des niveaux d'interaction pouvant varier du contrôle supervisé à la téléopération.
- À distance, les opérateurs doivent au moins disposer de retours visuels et sonores sur l'environnement de travail. Ils ont besoin d'une vue globale de l'atelier, d'une vision de l'état de propreté

globale de la cuve, de visualiser avec précision l'efficacité des opérations de nettoyage en cours et d'une vue du niveau de remplissage de la poubelle mise sous l'orifice central de la cuve.

- Le système doit laisser suffisamment de marge de manœuvre aux opérateurs pour réguler les variabilités du propergol (quantité, viscosité, pégosité, sensibilité pyrotechnique) et de son nettoyage.
- De nombreuses autres opérations sont réalisées sur le poste de travail. La solution proposée semble être compatible avec ces opérations et une position de garage a été définie avec les opérateurs pour ne pas les gêner. Lors de l'étude détaillée de l'implantation du système final, il faudra valider que le système robot ne gêne pas les opérateurs durant chaque phase de fonctionnement.
- Les opérateurs ont apprécié la perspective d'avoir une assistance pour réaliser les opérations de nettoyage à distance, mais ils ont insisté pour que le système soit simple à utiliser et à maintenir.

Ces simulations impliquant les opérateurs ont permis de faire évoluer les hypothèses de conception sur le système robot. Les hypothèses précédentes étaient résumées sur la figure 4.2. Leur évolution est synthétisée sur la figure 4.7.

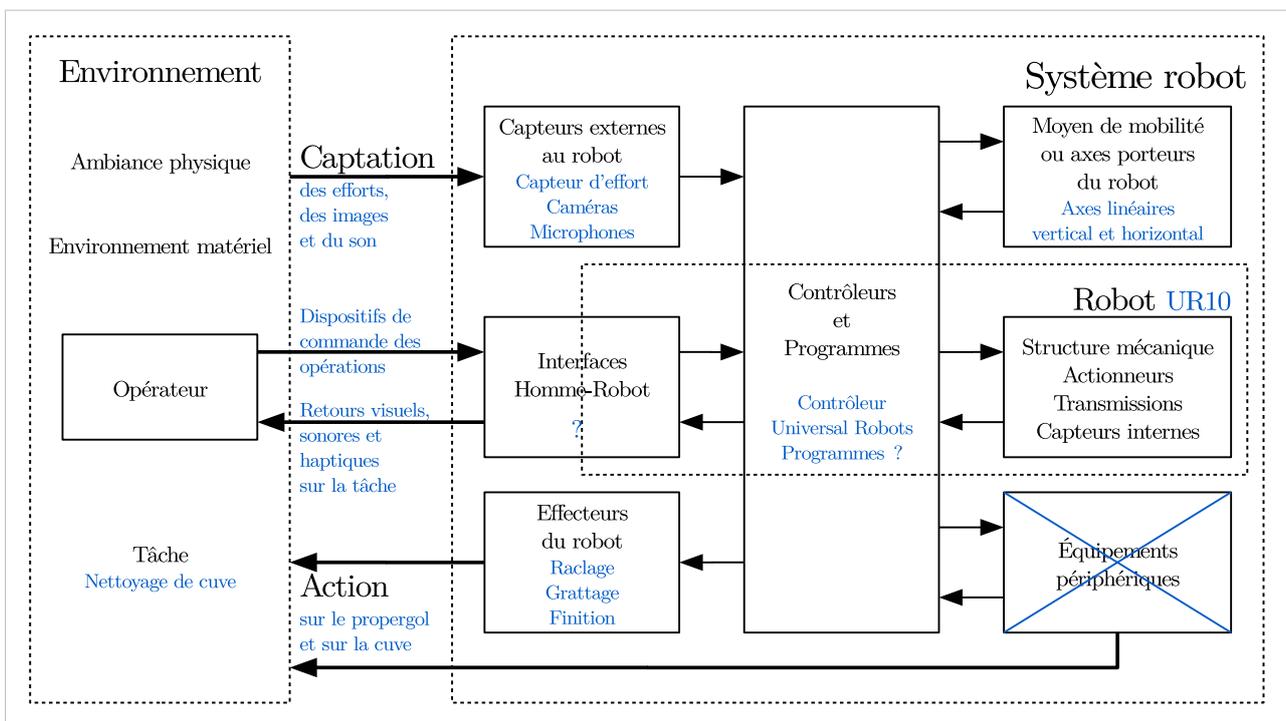


Figure 4.7 – Évolution des hypothèses de conception sur le système robot de nettoyage des cuves, suite aux premières simulations participatives. En noir, le modèle de base et, en bleu, les nouvelles hypothèses de conception.

Suite aux simulations, nous avons précisé les dimensions du robot manipulateur vis-à-vis de l'accessibilité aux parois de la cuve. Un modèle de robot industriel tel que l'UR10 du constructeur Universal Robots pourrait convenir. Avec ce robot industriel, le contrôleur du robot serait celui fourni par Universal Robots. Des premières trajectoires simples de nettoyage ont été simulées, mais les programmes du robot restent à préciser. Les simulations participatives ont mis en valeur la nécessité d'un axe porteur horizontal, en plus de l'axe vertical, pour positionner le robot lors des phases annexes au nettoyage de la cuve. L'étude sommaire du fonctionnement du système, avec les opérateurs, depuis l'arrivée de la cuve dans l'atelier jusqu'à son départ, n'a pas révélé de besoin d'équipement périphérique. Les opérateurs nous ayant fait part du besoin de retours sonores, les capteurs externes au robot devront également comprendre un ou des microphones. Les hypothèses de conception sur les effecteurs n'ont pas évolué.

4.2 Élaboration d'une maquette interactive et première simulation des interactions homme-robot

Les simulations précédentes ont permis d'évaluer et de préciser les hypothèses de conceptions sur les rôles de l'homme et du robot. La collaboration homme-robot proposée est supportée par des niveaux d'interaction qui varient du contrôle supervisé à la téléopération. Pour détailler la structure et le fonctionnement du système cobotique, nous avons étudié les composants permettant de réaliser ces interactions, puis évalué l'activité homme-robot à travers de nouvelles simulations participatives.

Pour le contrôle supervisé, une maquette d'interface graphique a été conçue et étudiée. Celle-ci est détaillée dans la thèse de Moulières-Seban [MS17]. Nous nous concentrons ici sur la conception de l'interaction en téléopération.

4.2.1 Définition des hypothèses de conception sur les interactions

Lors de la phase de conception précédente, nous avons montré qu'un système robot composé d'un robot manipulateur 6 axes, porté par deux axes linéaires additionnels, avec des effecteurs semblables aux outils actuellement utilisés par les opérateurs, peut être adapté à la réalisation des tâches de nettoyage. Les simulations participatives ont précisé le besoin de retours visuels et sonores pour effectuer ces opérations.

La figure 4.7 précédente résume nos hypothèses de conception et met en lumière le manque d'éléments sur les interactions homme-robot et notamment sur les interfaces. Ces dernières doivent permettre aux opérateurs de commander les opérations de nettoyage à distance et leur fournir les retours d'informations adaptés. Dans cette phase de conception nous nous intéressons plus précisément aux dispositifs de commandes et à la forme des retours d'informations dont ont besoin les opérateurs pour nettoyer la cuve à distance, en collaboration avec le robot.

4.2.1.1 Caractérisation des degrés de liberté nécessaires aux opérateurs

Actuellement, les opérateurs déplacent les outils sans contrainte de position ou d'orientation. Ils peuvent donc être amenés à utiliser les 6 degrés de liberté possibles dans l'espace (3 pour la position et 3 pour l'orientation) pour effectuer des mouvement⁷. Les opérations de nettoyage (raclage, grattage, finition) étant effectuées sur les surfaces planes ou légèrement incurvées de la cuve, un nombre restreint de degrés de liberté pourrait suffire pour réaliser les trajectoires des outils. Pour les autres opérations, telles qu'éloigner l'outil de la surface avant de se positionner sur une autre zone ou changer d'outil, l'analyse n'a pas mis en valeur d'expertise gestuelle des opérateurs. On part donc du postulat qu'elles peuvent être automatisées. Pour le changement d'outil par exemple, les variabilités principales sont la forme, la position et l'orientation des outils à saisir. Un changeur d'outil automatique avec des outils indexés dans un magasin et des interfaces mécaniques adaptées au robot, permettraient de décharger les opérateurs de cette opération sans valeur ajoutée.

Nous prenons pour hypothèse que réduire le nombre de degrés de liberté des mouvements de nettoyage commandés en téléopération permet de réduire la complexité d'exécution des trajectoires et ainsi d'augmenter l'efficacité des opérations. Cependant, les contraintes appliquées sur les déplacements doivent laisser suffisamment de marge de manœuvre aux opérateurs pour gérer les variabilités, telles que la quantité de produit ou sa viscosité, et les imprévus. Cette hypothèse sera étudiée lors des simulations avec les opérateurs pour évaluer le potentiel gain en efficacité.

En s'appuyant sur l'analyse de l'activité de nettoyage des opérateurs, nous pouvons définir les axes selon lesquels ils ont besoin de contrôler les mouvements des outils. Pour qualifier la position et

7. On peut noter qu'actuellement ces mouvements sont malgré tout contraints par le fait que les opérateurs doivent nettoyer la cuve depuis l'extérieur en manipulant de grands outils pour atteindre des surfaces à plus d'un mètre de portée.

l'orientation de l'outil dans l'espace, nous définissons les repères suivants :

- R_c : repère de base de la cuve, positionné au centre de l'orifice de fond de cuve.
- R_t : repère de l'outil en bout de robot (cf. figures 4.9 et 4.10). Pour l'outil de raclage par exemple, il est positionné au milieu de l'arête en bout de raclette. L'orientation du repère suit celle de l'outil.
- R_i : repère de commande, à partir duquel sont définis les directions de déplacements de l'outil (cf. figure 4.8). L'orientation du repère R_i est définie de manière à ce que son axe z soit vertical et son axe x pointe dans la direction opposée à l'axe de révolution de la cuve. Son centre est le même que celui du repère R_t .

La cuve étant cylindrique, nous exprimons la position de l'outil par rapport au repère R_c suivant des coordonnées cylindrique (r, θ, h) . En effet, les déplacements sur les surfaces de la cuve pourront être caractérisés simplement dans ce repère, contrairement à des coordonnées cartésiennes qui rendraient plus complexe l'expression de trajectoires cylindriques. Dans la suite, nous détaillerons les positions et orientations des repères en illustrant avec la raclette. Le raisonnement est similaire pour les autres outils et n'est pas détaillé. La position et l'orientation du repère R_i sont ainsi illustrées sur la figure 4.8.

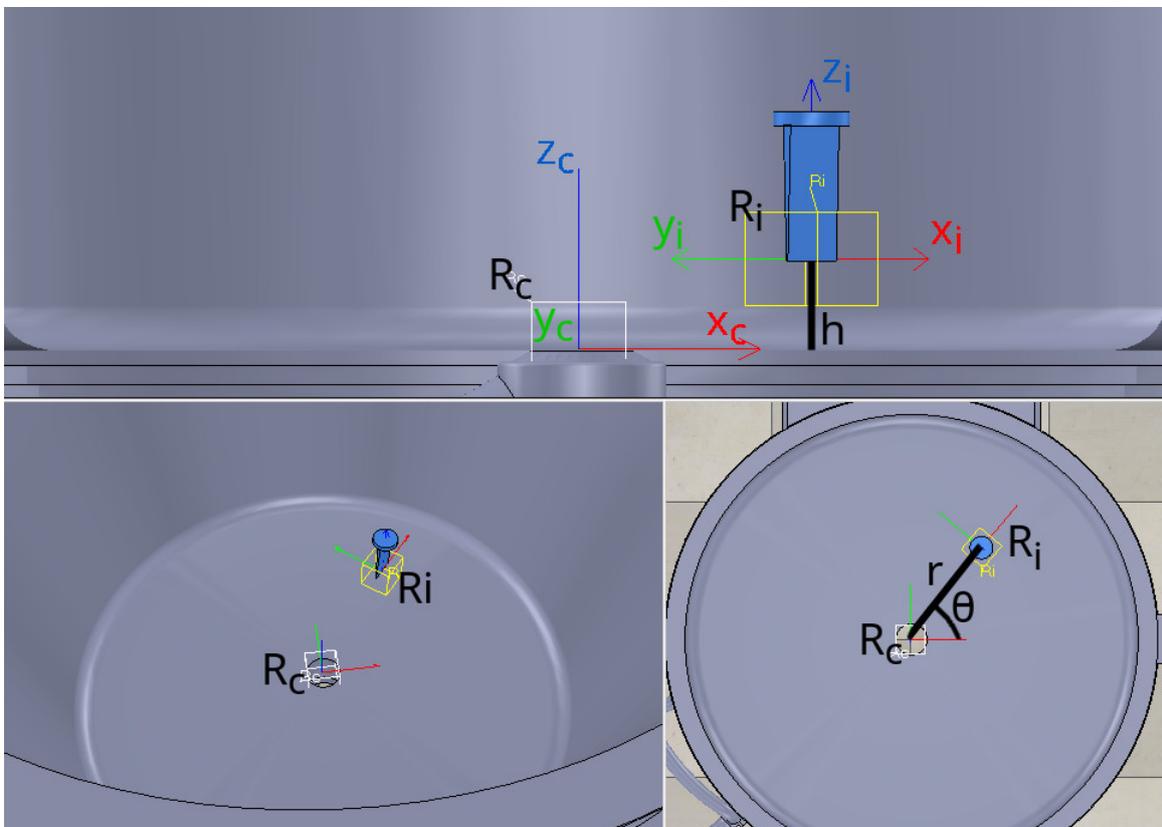


Figure 4.8 – Repère R_i et coordonnées cylindriques (r, θ, h) de l'outil, par rapport au repère R_c .

Les coordonnées cylindriques (r, θ, h) permettent de définir le repère R_i , en prenant en compte les contraintes énoncés ci-dessus. L'orientation du repère R_i par rapport au repère R_c est définie par une rotation d'angle θ autour de l'axe z_c :

$$A_{R_c}^{R_i} = Rot_z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Sa position est défini par la translation suivante par rapport au repère R_c :

$$B_{R_c}^{R_i} = \begin{pmatrix} r \cos(\theta) \\ r \sin(\theta) \\ h \end{pmatrix}$$

La matrice de passage de R_c à R_i est donc :

$$P_{R_c}^{R_i} = \left\| \begin{array}{cc} A_{R_c}^{R_i} & B_{R_c}^{R_i} \\ 0_{(13)} & 1_{(11)} \end{array} \right\| = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & r \cos(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & r \sin(\theta) \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Le repère R_t est positionné sur le centre de la zone de travail de l'outil, de même que le repère R_i :

$$B_{R_c}^{R_t} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

La transformation du repère R_i au repère R_t indique l'orientation de l'outil par rapport au repère de commande. Cette orientation est caractérisée par la combinaison de trois rotations de base avec les angles d'Euler (α, β, γ) : une rotation d'angle α autour de l'axe z_i du repère R_i , suivie d'une rotation d'angle β autour de l'axe y'_i du repère R'_i obtenu après la première rotation, suivie d'une rotation d'angle γ autour de l'axe x_t du repère R_t . La matrice de rotation du repère R_i vers le repère R_t est le produit des matrices de rotation de base :

$$A_{R_i}^{R_t} = Rot_z(\alpha) Rot_y(\beta) Rot_x(\gamma)$$

Où :

$$Rot_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$Rot_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & -\sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{pmatrix}$$

$$Rot_x(\gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ 0 & \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{pmatrix}$$

L'angle α correspond à l'orientation de l'outil dans le plan horizontal (cf. figure 4.9). L'angle β correspond à l'orientation complémentaire de l'arête en bout de raclette par rapport à la surface à nettoyer. Par exemple, pour $\beta = 0$, l'arête est parallèle au fond de cuve (cf. figure 4.9), et pour $\beta = -\frac{\pi}{2}$, l'arête est verticale (cf. figure 4.10). Dans les cas où l'arête de la raclette est parallèle au fond de la cuve ou à la virole, l'angle γ correspond à l'inclinaison du plan de la raclette par rapport à la normale de la surface à nettoyer (cf. figures 4.9 et 4.10).

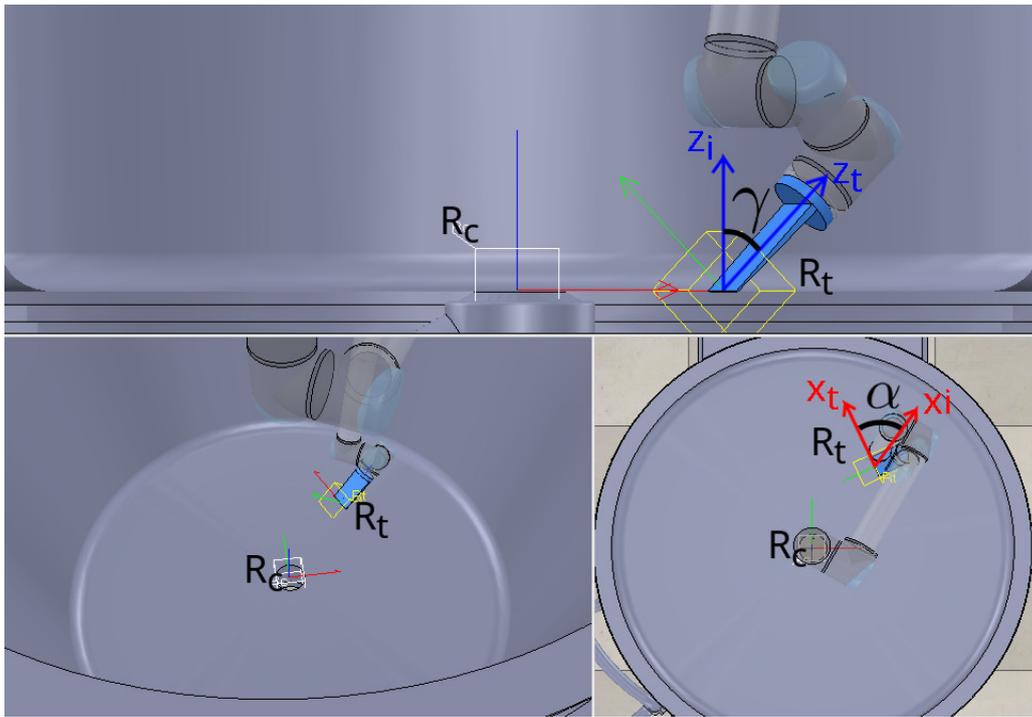


Figure 4.9 – Repère R_t et orientation de l'outil ($\alpha, \beta = 0, \gamma$) par rapport aux axes du repère R_i , pour un raclage en fond de cuve.

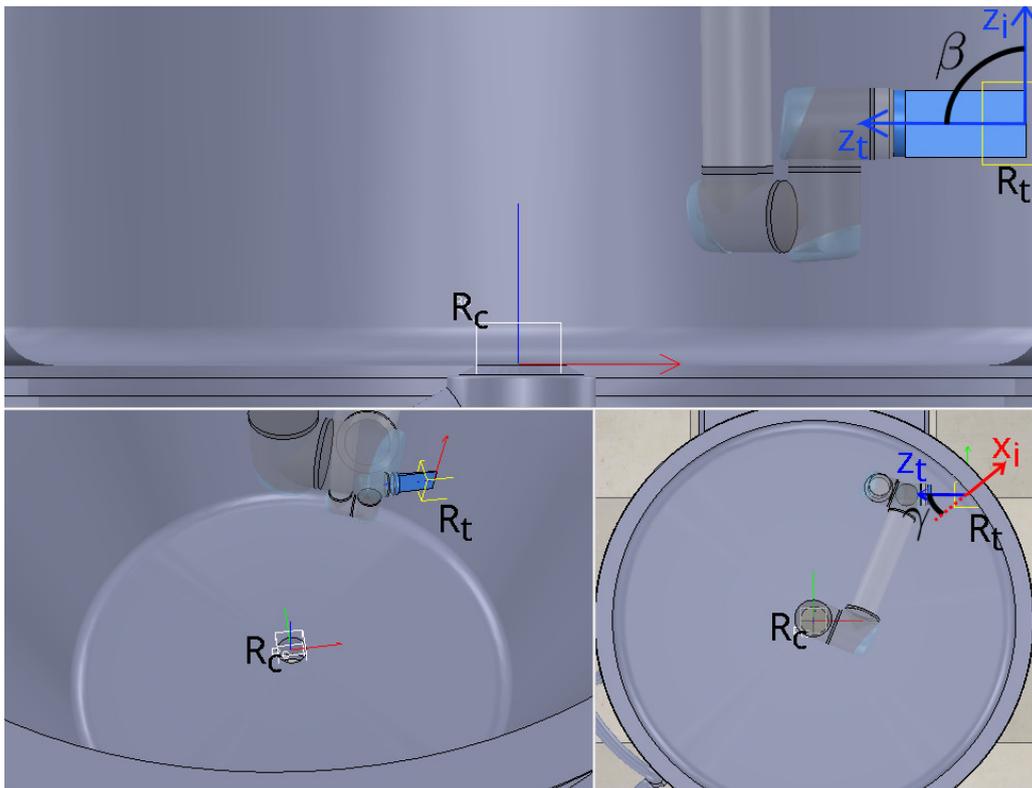


Figure 4.10 – Repère R_t et orientation de l'outil ($\alpha, \beta = -\frac{\pi}{2}, \gamma$) par rapport aux axes du repère R_i , pour un raclage sur la virole.

Les 6 degrés de liberté disponibles par défaut peuvent ainsi être caractérisés par les paramètres $(r, \theta, h, \alpha, \beta, \gamma)$. Si l'opérateur contrôle ces 6 paramètres, il peut déplacer l'outil dans la cuve et l'orienter comme il le souhaite⁸. Pour contraindre les déplacements de l'outil, il suffit de figer certains de ces

8. En restant dans l'enveloppe de travail du robot et aux alignements singuliers des axes de rotation près.

paramètres.

Lors du raclage en fond de cuve, les trajectoires de nettoyage sont réalisées dans un plan horizontal. Les contraintes en position suivantes peuvent être appliquées :

- $h = 0$: pour contraindre les déplacements dans le plan horizontal du fond de cuve.
- $\beta = 0$: pour que l'arête en bout de raclette soit contenue dans le plan du fond de cuve.

De manière transitoire, il peut être nécessaire d'éloigner la raclette de la surface du fond de cuve, pour racler une nouvelle zone ou lorsque le raclage du fond de la cuve est terminé. Nous prenons pour hypothèse que ces déplacements ne nécessitent pas un contrôle continu de la part de l'opérateur et que l'application de l'outil sur la surface de la cuve peut être actionné par une commande binaire, à l'aide d'un bouton par exemple.

Bien que dans la pratique des opérateurs l'inclinaison de la raclette soit variable car elle est difficile à contrôler manuellement, nous prenons pour hypothèse qu'il existe une inclinaison γ_o pour laquelle la qualité du raclage est optimale dans les différentes situations. Nous pouvons alors ajouter la contrainte suivante : $\gamma = \gamma_o$. Cette hypothèse sera évaluée dans la section 4.3.2.

Enfin, en supposant que la manière la plus efficace de nettoyer le fond de la cuve est de réaliser des trajectoires radiales, depuis la limite avec la virole jusqu'à l'orifice central, nous pouvons contraindre l'orientation de l'outil vers le centre de la cuve en posant $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Cette stratégie est utilisée par la majorité des opérateurs.

Il est donc envisageable de contraindre jusqu'à 4 paramètres pour le nettoyage du fond de cuve, laissant 2 DDL aux opérateurs pour commander le déplacement des outils dans le plan horizontal : r et θ . Ces degrés de liberté sont nécessaires pour que l'opérateur puisse positionner l'outil où il le souhaite en fonction de l'efficacité du nettoyage au cours des opérations et de la localisation des résidus de propergol sur la surface du fond de cuve.

Lors du passage de l'outil sur la virole, les trajectoires de nettoyage sont réalisées à une distance r_{cuve} , correspondant au rayon de la cuve, de l'axe de révolution de la cuve. La contrainte en position suivante peut donc être appliquée pour maintenir l'outil sur la paroi latérale : $r = r_{cuve}$. De même que pour le fond de cuve, nous prenons pour hypothèse que l'application de l'outil sur la virole peut être actionné par une commande binaire.

Sur la virole, principalement deux stratégies de trajectoires ont été envisagées pour nettoyer les traces de propergol :

- des passes rectilignes verticales de l'outil du haut vers le bas (cf. figure 4.11 à gauche) ;
- des passes circulaires de l'outil sur le pourtour de la virole, en commençant par le haut de la cuve et en terminant en bas (cf. figure 4.11 à droite).

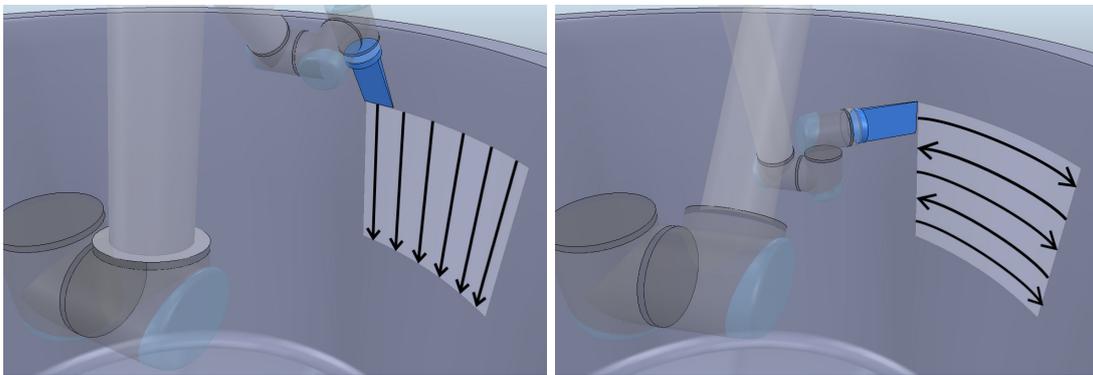


Figure 4.11 – Stratégies de nettoyage sur la virole : trajectoires verticales (à gauche) et trajectoires circulaires (à droite).

Avec les trajectoires verticales, les contraintes suivantes peuvent être posées :

- $\alpha = \frac{\pi}{2}$: pour orienter la raclette vers le centre de la cuve.
- $\beta = 0$: pour un contact optimal entre le bout de la raclette et la virole.
- $\gamma = -\frac{\pi}{2} + \gamma_o$: pour avoir un angle d'inclinaison γ_o de la raclette avec la normale à la surface de contact.

Avec les trajectoires circulaires, l'orientation de la raclette peut être contrainte en fixant les paramètres suivants :

- $\beta = -\frac{\pi}{2}$: pour que l'arête en bout de raclette soit orientée verticalement.
- $\gamma = \pm\gamma_o$: où le signe dépend du sens de rotation. Lorsque la trajectoire circulaire va dans le sens des θ croissant, $\gamma = +\gamma_o$.
- $\alpha = 0$: car pour $\beta = -\frac{\pi}{2}$, $x_t = z_i$ ⁹. Cette valeur d' α est choisie de manière à conserver le paramètre γ comme indicateur de l'inclinaison de la raclette.

Dans les deux cas, pour le nettoyage de la virole il reste à commander : h et θ . Ces deux degrés de liberté sont nécessaires pour que l'opérateur puisse contrôler les déplacements de l'outil sur la surface de la virole, pour les mêmes raisons que pour le fond de cuve.

Avec des trajectoires verticales, l'intersection entre le plan de la raclette et la virole est un arc dont le rayon de courbure dépend de l'inclinaison γ de la raclette. Maximiser le contact entre l'outil et la surface à nettoyer est important pour obtenir une bonne qualité de raclage. Ainsi, le raclage de la virole, selon des trajectoires verticales, nécessite une raclette ayant une courbure adaptée à l'inclinaison γ . Pour pouvoir adapter l'inclinaison de la raclette aux variabilités du nettoyage nous avons choisi de privilégier les stratégies de nettoyage de la virole selon des trajectoires circulaires. Par ailleurs, la circonférence de la cuve étant supérieure à la hauteur de la virole, le nombre de passes, pour couvrir toute la surface de la virole avec une largeur de raclette donnée, est inférieur avec des trajectoires circulaires qu'avec des trajectoires verticales. Lors du nettoyage circulaire, la transition entre deux passes se fait simplement en baissant l'outil d'une largeur de passe. Lors du nettoyage vertical, les passes se font de bas en haut et à la fin d'une passe l'outil doit remonter toute la hauteur de la virole pour en commencer une nouvelle. Le choix des trajectoires circulaires permet ainsi de réduire la durée et le nombre de transitions sans valeur ajoutée entre les trajectoires de nettoyage.

Pour le nettoyage du fond de cuve, comme celui de la virole, les trajectoires de pilotage du système robot pourraient être réduites à 2 degrés de liberté. Des contraintes peuvent être appliquées pour adapter l'orientation de l'outil à la surface à nettoyer. La distance entre l'outil et la surface pourrait être commandée de manière binaire. Ces hypothèses sont évaluées dans la suite de ce chapitre. Ainsi les dispositifs de commande offrant au moins 2 DDL aux opérateurs, pourraient permettre de réaliser les tâches de nettoyage en téléopération. Les autres paramètres pourront être modifiés à travers une interface utilisateur.

4.2.1.2 Choix de dispositifs de commande pour la téléopération

La réalisation des tâches de nettoyage en téléopération nécessite de fournir aux opérateurs un moyen pour piloter l'effecteur du robot manipulateur selon au moins 2 degrés de liberté. Différents dispositifs de commande permettent de piloter les robots industriels. Les pendants d'apprentissage fournis avec ces robots permettent de les piloter à distance, mais ils sont prévus pour programmer les trajectoires avant la mise en production et non pas pour contrôler le robot en fonctionnement. Par ailleurs, ces dispositifs de commande permettent de déplacer un robot axe par axe ou son effecteur suivant une direction à la fois. Par conséquent, bien qu'ils offrent les 6 degrés de liberté, ils ne permettent d'en contrôler qu'un seul à chaque instant.

9. Cet alignement singulier des axes de rotation est connu sous le terme de blocage de cardan. Il est lié à l'utilisation des trois angles α , β et γ pour caractériser l'orientation de l'outil. Pour notre application, les repères R_i et R_t ont été choisis de manière à ce qu'il n'y ait pas d'impact sur les degrés de liberté nécessaire au nettoyage de la virole et du fond de cuve.

Certains dispositifs ont été conçus pour contrôler les robots manipulateur en téléopération. On retrouve les bras maîtres à retour d'effort (aussi appelés bras haptiques) développés notamment pour la réalité virtuelle, avec de premières applications industrielles dans le nucléaire [GRDM10]. Ces dispositifs permettent de piloter simultanément jusqu'à 6 DDL en position, mais aussi en effort. Ils peuvent avoir diverses structures : série, parallèle ou mixte [GA11]. D'après Gosselin et Andriot, les structures séries permettent d'obtenir un espace de travail supérieur aux structures parallèles, notamment en terme d'orientation. Les structures parallèles sont utilisées pour leurs performances dynamiques avantageuses. La combinaison de ces deux types de structures peut fournir un compromis intéressant.

Des dispositifs haptiques avec ces différentes structures sont commercialisés pour des applications industrielles, médicales et de réalité virtuelle. Le PHANToM [MS94], conçu à l'origine par Massie en 1993, a été précurseur du développement des dispositifs haptiques avec une structure série [GA11]. Il est aujourd'hui commercialisé par la société 3D Systems sous le nom Geomagic Touch¹⁰ et est utilisé sur des applications de téléopération robotique en réalité virtuelle¹¹. La version Phantom 1.5/6DOF des dispositifs haptiques commercialisés par 3D Systems a été l'objet de développements pour la téléopération de robot industriel [NRB07].

Le CEA-LIST – institut de recherche technologique du CEA sur les systèmes numériques intelligents – a développé en 2000 le dispositif haptique Virtuose 3D [GR01]. Ce produit, et ses évolutions telles que le Virtuose 6D [GFL04] et le Virtuose 6D TAO¹², sont commercialisés par la société Haption, issue du CEA. Ces dispositifs ont une structure série. Ils sont utilisés principalement dans l'industrie nucléaire et pour des simulations en réalité virtuelle [GMG⁺10].

La société Force Dimension commercialise des dispositifs haptiques avec une base parallèle. Le développement d'un dispositif haptique à structure parallèle delta avec 3 degrés de liberté est à l'origine de ces produits [GCH⁺01]. Ce dispositif haptique se retrouve dans les produits delta.3 et omega.3 de Force Dimension qui ont une structure parallèle. Le delta.6, l'omega.6 et le sigma.7 sont des évolutions qui présentent une structure mixte pour offrir jusqu'à 6 degrés de liberté en position¹³. Le sigma.7 est actuellement le produit le plus avancé de Force Dimension et il est utilisé pour de la téléopération robotique sur des applications médicales [TAS12].



Figure 4.12 – Bras haptiques commercialisés : sigma.7 de Force Dimension (à gauche), Virtuose 6D TAO d'Haption (au milieu) et Geomagic Touch de 3D Systems (à droite).

D'autres dispositifs, tels que la SpaceMouse de 3Dconnexion¹⁴, ont été conçus pour interagir avec des objets numériques 3D dans des applications de CAO. Ces dispositifs permettent de commander

10. <https://www.3dsystems.com/haptics-devices/geomagic-touch>

11. <https://www.3dsystems.com/scanners-haptics/application-gallery/vr4robots>

12. <https://www.haption.com/fr/products-fr/virtuose-6d-tao-fr.html>

13. <http://www.forcedimension.com/products>

14. <https://www.3dconnexion.fr/products/spacemouse.html>

simultanément jusqu'à 6 DDL, sans retour d'effort. Ils peuvent ainsi être utilisés pour déplacer et orienter l'effecteur d'un robot manipulateur en téléopération [NPH08].

Les joysticks sont utilisés sur certaines applications industrielles pour commander des robots manipulateurs. Un joystick permet de commander 2 voire 3 degrés de liberté en fonction du nombre d'axe qu'il possède. Pour des applications nécessitant plus de degrés de liberté, deux joysticks peuvent être utilisés [NPH08]. Il existe des joysticks avec ou sans retour de force. MRK-Systeme commercialise des systèmes avec joysticks pour piloter à distance des robots industriels ¹⁵ (voir figure 4.13).



Figure 4.13 – Commande d'un robot industriel à l'aide de joysticks, par la société MRK-Systeme.

D'autres dispositifs sont développés pour commander un robot manipulateur à distance, tels que les interfaces cerveau-ordinateur (Brain Computer Interface en anglais) [CLF13] et les moyens de capture de mouvements [FSNP09]. Pour ces derniers, la position et l'orientation de la main capturées peuvent être utilisés comme consigne de position et l'orientation de l'effecteur du robot. Ces développements sont au stade de la recherche et n'ont pas été éprouvés en production sur des applications industrielles.

La réalisation d'opérations pyrotechniques en téléopération nécessite de choisir un dispositif robuste pour être utilisé en production quotidiennement par les opérateurs, tout en maintenant un haut niveau de fiabilité. Il doit offrir aux opérateurs de la réactivité et de la précision pour maîtriser les opérations et garantir la sécurité. Ainsi, nous considérons que les joysticks et les bras haptiques, déjà éprouvés sur des applications industrielles, peuvent offrir une réponse aux besoins du nettoyage des cuves de propergol en téléopération.

4.2.1.3 Définition des retours d'informations

L'expertise visuelle des opérateurs a été mise en valeur lors de l'analyse de l'activité. Les retours d'informations visuelles et plus largement l'interface de supervision doivent notamment permettre aux opérateurs de :

- Évaluer la quantité et l'aspect du produit présent sur la surface en cours de nettoyage.
- Évaluer l'efficacité de l'opération de nettoyage en cours.
- Connaître le niveau de saleté des outils.
- Maîtriser les trajectoires des outils pendant la réalisation des opérations.
- Inspecter et avoir conscience de l'état de propreté de l'ensemble des surfaces de la cuve.
- Connaître l'état du robot (puissance active, prêt, cycle automatique en cours, en arrêt sécurisé, butées en téléopération, etc.)

15. <https://ifr.org/case-studies/industrial-robots/the-dream-team>

- Observer l'atelier pour vérifier les trajectoires du robot lors de sa mise en position de garage ou de maintenance/nettoyage, ou pour prendre des mesures en cas d'intrusion de personnel par exemple.

L'état du robot pourra être communiqué principalement à travers l'interface de supervision (hors vues caméras). Les retours visuels sont nécessaires pour donner les autres informations à l'opérateur. Nous prenons les hypothèses suivantes :

- Une caméra au niveau de l'effecteur du robot permettra d'évaluer avec précision l'état de propreté des surfaces, l'efficacité des opérations en cours et l'état des outils.
- Une autre caméra placée au niveau de la base du robot permettra d'avoir une vision plus globale de l'état de nettoyage de la cuve et des opérations dans la cuve pour maîtriser les trajectoires d'outils.
- Une troisième caméra placée sur un mur de l'atelier donne une vue fixe pour repérer la position et les mouvements du robot dans et hors de la cuve et permet de vérifier l'absence de personnel dans les locaux¹⁶.
- Ces trois vues donnent les informations visuelles nécessaires aux opérateurs pour gérer les différentes situations de travail aussi bien en supervision qu'en téléopération.

Le besoin du retour sonore a été mis en valeur durant l'analyse de l'activité des opérateurs, notamment pour être alerté au plus tôt d'un risque de prise en feu. Cependant nous avons choisi de ne pas le simuler ici car c'est une information nécessaire ponctuellement qui n'est pas déterminante pour la conception à ce stade. Par ailleurs, la conception de ce retour d'information ne présente pas de spécificité car les postes de supervision chez ArianeGroup sont toujours équipés de retours sonores. Ils servent notamment à la détection d'anomalie pouvant générer un risque pyrotechnique.

Actuellement les opérateurs régulent les efforts qu'ils appliquent lors du nettoyage en fonction de la résistance mécanique du produit et de leur besoin de s'économiser pour réduire leur fatigue. L'introduction d'un système robot pouvant générer des efforts suffisant pour nettoyer le produit, de manière répétable, pourrait réduire le besoin de fournir aux opérateurs un retour haptique. Cette hypothèse est étudiée dans la section 4.3.4.

4.2.1.4 Synthèse des hypothèses établies

Nous avons établi les hypothèses suivantes sur les besoins des opérateurs pour réaliser le nettoyage des cuves en téléopération avec le système robot :

- Le dispositif de commande du système robot en téléopération doit fournir au moins 2 degrés de liberté aux opérateurs pour piloter de manière continue les opérations de nettoyage. D'autres moyens, tels que des boutons, peuvent servir à commander des déplacements intermédiaires automatisés, comme le passage d'une surface à une autre.
- Les contraintes appliquées à l'orientation et au déplacement de l'outil, pour réduire le nombre de degrés de liberté, laissent suffisamment de marge de manœuvre pour répondre aux variabilités des situations de nettoyage et pour en assurer la qualité.
- Des dispositifs de type joystick et bras haptique offrent suffisamment de liberté pour permettre aux opérateurs de réaliser le nettoyage des cuves en téléopération.
- Ces dispositifs de commande sont suffisamment robustes et fiables pour être utilisés en production régulièrement par les opérateurs sur une application pyrotechnique.
- Trois caméras donnent les informations visuelles nécessaires pour gérer les diverses situations au poste : une vue atelier, une vue globale de la cuve et une vue outil.
- Les mêmes retours visuels peuvent être utilisés pour la supervision et la téléopération.
- La nécessité du retour haptique pour cette application en téléopération est à démontrer.

16. En parallèle d'autres systèmes de sécurité, tels que des barrières immatérielles, permettant de couper instantanément la puissance en cas de franchissement.

4.2.2 Développement d'une maquette numérique interactive

Pour évaluer les hypothèses définies précédemment, nous nous intéressons maintenant au développement d'une maquette de système de téléopération avec laquelle les opérateurs peuvent interagir. L'objectif est d'utiliser cette maquette pour commencer à observer l'activité homme-robot en simulation, afin d'évaluer les besoins des opérateurs en fonctionnement. Pour élaborer cette maquette, nous nous sommes appuyés sur le modèle numérique du système robot et de l'atelier réalisé précédemment avec V-REP. Nous avons choisi d'y intégrer un dispositif réel pour commander le système virtuel et avons placé des caméras virtuelles pour simuler les retours visuels sur les opérations. Ces développements sont détaillés dans les sous-sections suivantes.

4.2.2.1 Choix et intégration d'un dispositif de commande avec V-REP

Pour commander le système robot de nettoyage des cuves virtuel modélisé dans V-REP, il est nécessaire d'y intégrer un dispositif de commande avec au moins 2 DDL. Nous avons retenu précédemment les dispositifs de type joystick et bras haptique comme pouvant répondre aux besoins du nettoyage des cuves. Nous avons souhaité présenter rapidement une maquette de système de téléopération de nettoyage des cuves aux opérateurs afin d'avoir de premiers retours de leur part, sur le fonctionnement du système cobotique, au plus tôt dans la conception. Pour cela nous avons choisi d'écarter le développement de la commande du système virtuel avec un bras haptique, qui nécessite une boucle de contrôle spécifique avec une fréquence d'asservissement de l'ordre de la milliseconde pour avoir un retour d'effort de qualité [GRMA10]. À ce stade, nous avons donc privilégié l'implémentation d'une commande simplifiée suivant 2 degrés de liberté avec un joystick, par ailleurs plus facile à se procurer.

L'environnement Lua intégré dans V-REP ne permet pas nativement de récupérer les commandes d'un joystick. L'architecture de contrôle de V-REP offre cependant de nombreux moyens de communications avec un client externe [RSF13] :

- Communication directe entre le client et un script Lua, par "socket" par exemple.
- Création du client sous forme de "plugin" de V-REP.
- Communication entre un client et V-REP par la "Remote API" ¹⁷.
- Communication entre un client ROS et V-REP à travers un "plugin" ROS.

Un client externe a donc été développé pour implémenter la communication avec le joystick.

Le dispositif de commande permet de piloter l'effecteur du robot pour réaliser les actions de nettoyage. En complément, une interface utilisateur est nécessaire pour naviguer dans le scénario des opérations, par exemple pour passer du mode supervisé au mode téléopéré, ou pour choisir la surface à nettoyer.

V-REP permet la création d'interfaces graphiques intégrées, dont les événements ¹⁸ sont gérés nativement, pour faciliter la personnalisation et le contrôle des simulations. Au moment du développement, seule une interface basée sur OpenGL était disponible avec des fonctionnalités limitées ¹⁹. Elle n'a donc pas été choisie pour implémenter l'interface graphique.

Le client externe développé réunit la communication avec le joystick et l'interface graphique utilisateur. Python est un langage permettant le développement rapide de programmes, il a été choisi pour accélérer l'implémentation du client. Nous avons ainsi utilisé la "Remote API" pour établir la communication du client Python avec V-REP. L'architecture de communication mise en place entre l'utilisateur, le joystick, l'interface de graphique et le modèle V-REP est schématisé dans la figure 4.14.

17. "API distante" permettant de communiquer avec V-REP depuis un client externe.

18. C'est-à-dire les actions telles que l'appui sur un bouton, la saisie d'une valeur ou le déplacement d'un curseur.

19. Depuis la version 3.3.1, V-REP intègre le développement d'interfaces plus complètes basées sur Qt.

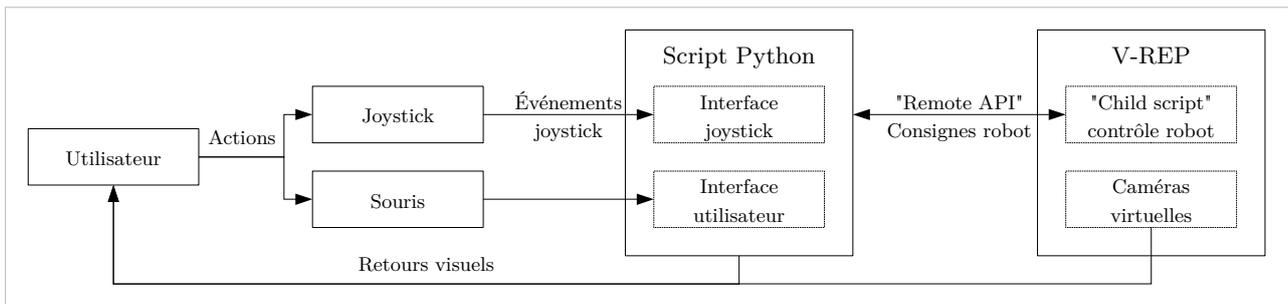


Figure 4.14 – Architecture logicielle pour la simulation des interactions entre l'utilisateur, les dispositifs de commande et V-REP.

Les événements du joystick, qui sont générés lorsque l'utilisateur réalise des actions, sont récupérés dans l'"interface joystick" à l'aide de la bibliothèque logicielle `sdl2`²⁰. Les déplacements des axes du joystick sont transformés en consignes robot (cf. section 4.2.2.3) et envoyés à V-REP à l'aide de la "Remote API". Cette consigne est récupérée dans un "child script" qui l'adapte pour envoyer une consigne de position au robot virtuel. La fréquence de la communication est de l'ordre de 50 Hz et il n'y a pas de délais observable dans le pilotage du robot virtuel avec le joystick.

L'utilisateur peut également réaliser des actions à travers une interface graphique avec la souris d'ordinateur. Cette interface graphique a été réalisée avec la bibliothèque logicielle `tkinter`²¹. Elle permet de réaliser des actions simples pour les besoins de la simulation, telles que prendre la raclette, choisir la surface à nettoyer, lancer un cycle automatique et passer en mode téléopération (cf. figure 4.15).

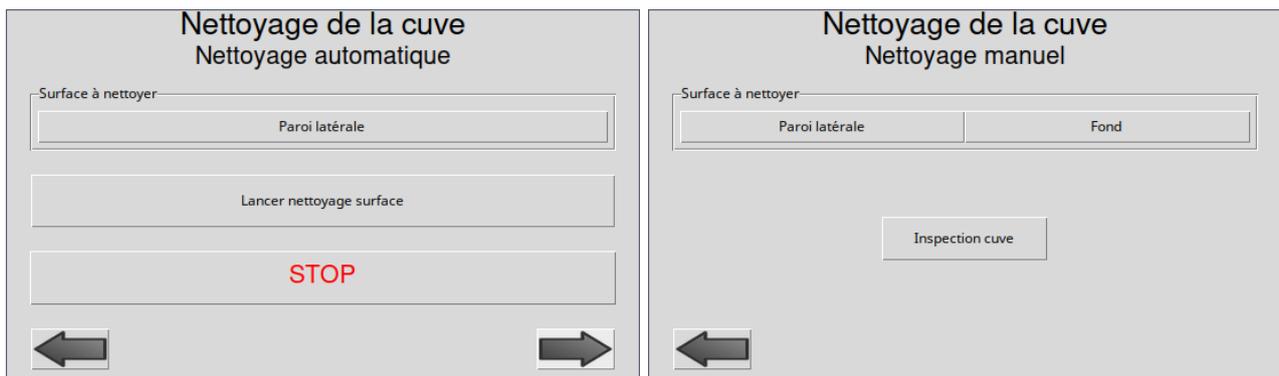


Figure 4.15 – Exemples d'écrans de l'interface graphique utilisateur pour la simulation du nettoyage des cuves : à gauche, un écran permettant de lancer un cycle automatique, à droite, un écran permettant de sélectionner la surface à nettoyer en téléopération.

Les événements générés par les actions sur l'interface graphique sont envoyés à V-REP à travers la "Remote API" pour modifier la scène virtuelle. Les consignes robots sont également traitées dans le "child script" pour contrôler le robot virtuel.

Des caméras virtuelles placées dans l'environnement de la scène 3D V-REP permettent de récupérer des informations visuelles qui sont affichées à l'utilisateur (cf. section 4.2.2.2).

4.2.2.2 Implémentation des retours visuels avec V-REP

Dans nos hypothèses de conception sur les retours visuels, nous avons défini trois vues caméras nécessaires aux opérateurs pour la réalisation des opérations à distance : une vue atelier, une vue globale de la cuve et une vue outil. Pour évaluer le positionnement et le champ de vue de ces caméras

20. <https://www.libsdl.org/>

21. <https://wiki.python.org/moin/TkInter>

en simulation avec les opérateurs, nous avons ajouté des caméras virtuelles dans la scène V-REP. Pour simuler les écrans de contrôle des opérateurs, nous avons affiché les vues sur différentes zones de l'écran (cf. figure 4.16). L'écran est partagé en quatre zones : trois pour les vues issues des caméras virtuelles et une zone pour l'interface utilisateur.

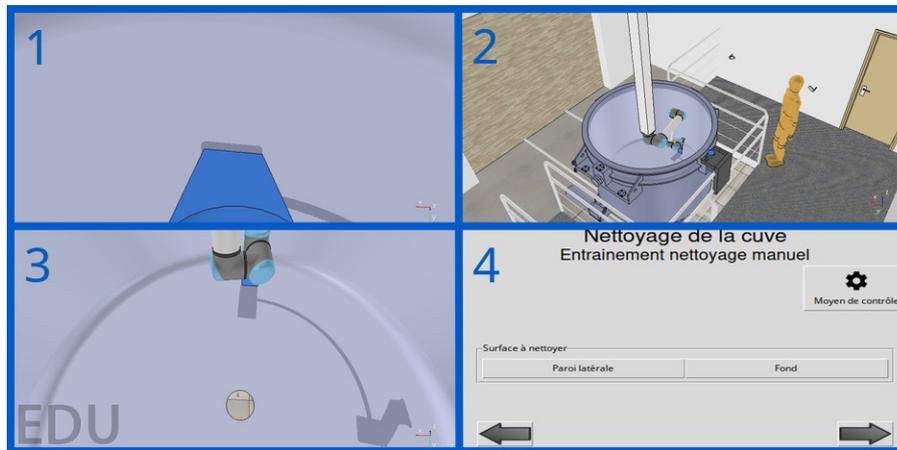


Figure 4.16 – Retours visuels des caméras virtuelles sur V-REP et interface utilisateur lors d'un nettoyage du fond de cuve : 1) vue outil, 2) vue atelier, 3) vue cuve, 4) interface utilisateur.

Pour aider les opérateurs à se représenter l'action des outils lors du nettoyage de la cuve en simulation, nous avons modélisé une couche représentant le propergol présent sur les surfaces de la cuve. Le nettoyage du propergol est simulé en projetant des particules, de la couleur de la cuve et de la forme de l'outil, sur le produit virtuel lors du passage de l'outil au contact de la surface. Cette simulation du procédé de nettoyage est illustrée sur les vues de la figure 4.16.

4.2.2.3 Implémentation de la commande avec un joystick

Un joystick avec 2 DDL peut être déplacé suivant deux axes x_{joy} et y_{joy} (voir figure 4.17). Nous notons $(p_{x_{joy}}, p_{y_{joy}})$ la position du joystick, avec $p_{x_{joy}} \in [-1, 1]$ et $p_{y_{joy}} \in [-1, 1]$. La position initiale du joystick correspond à $(p_{x_{joy}}, p_{y_{joy}}) = (0, 0)$.



Figure 4.17 – Direction des axes x_{joy} et y_{joy} du joystick.

Nous avons détaillé dans la section 4.2.1.1 comment contraindre les mouvements de l'effecteur du robot suivant 2 degrés de liberté, pour le nettoyage du fond de cuve et de la virole. Lors du nettoyage du fond de cuve, en suivant nos hypothèses de trajectoires radiales et de l'existence d'une inclinaison de la raclette γ_o optimale, les contraintes d'orientation suivantes peuvent être appliquées : $(\alpha = \frac{\pi}{2}, \beta = 0, \gamma = \gamma_o)$. Lorsque l'opérateur souhaite se déplacer le long de la surface du fond de cuve, sans racler le

propergol, il doit pouvoir positionner l'outil à une distance h_i de la paroi. Une commande en position est réalisée pour cela : lorsque l'opérateur appuie sur la gâchette du joystick alors $h = 0$ (l'outil se place au contact du fond de cuve), et lorsque l'opérateur relâche la gâchette alors $h = h_i$ (l'outil se dégage de la surface).

Les 2 degrés de liberté restant correspondent aux paramètres r et θ . Étant donné le faible espace de mouvements du joystick relativement à la dimension de la cuve, nous avons choisi d'adopter une commande en vitesse du robot avec le joystick, plutôt qu'une commande en position, pour maîtriser les mouvements de l'outil. En effet, avec une commande en position, le débattement du joystick suivant x_{joy} étant d'environ 10 cm pour un rayon de la cuve de l'ordre d'1 m, un déplacement du joystick d'1 cm générerait un mouvement de l'outil d'une dizaine de centimètres. Il serait donc difficile pour l'opérateur de maîtriser les trajectoires de nettoyage et leur vitesse. La loi de commande en vitesse pour le fond de cuve peut s'écrire ainsi :

$$\begin{cases} \frac{dr}{dt} = v_1 p_{x_{joy}} \\ \frac{d\theta}{dt} = v_2 p_{y_{joy}} \end{cases}$$

où v_1 et v_2 sont des nombres réels strictement positifs, correspondant aux vitesses maximales de déplacement de l'outil dans chaque direction. Cette commande ramène le produit vers l'orifice central de la cuve lorsque l'opérateur tire le joystick vers lui. Un déplacement latéral du joystick fait tourner l'outil autour de l'axe de révolution de la cuve.

Pour le nettoyage de la virole avec des trajectoires circulaire, les contraintes d'orientation suivantes peuvent être appliquées : ($\alpha = 0, \beta = -\frac{\pi}{2}, \gamma = \pm\gamma_o$). Lorsque l'opérateur souhaite se déplacer le long de la surface de la virole, sans racler le propergol, il doit pouvoir positionner l'outil à une distance r_i de la paroi. Une commande en position est réalisée pour cela : lorsque l'opérateur appuie sur la gâchette du joystick alors $r = r_{cuve}$ (l'outil se place en contact de la virole), et lorsque l'opérateur relâche la gâchette alors $r = r_{cuve} - r_i$ (l'outil se dégage de la surface).

Les 2 DDL restant correspondent aux paramètres θ et h . Nous avons implémenté la loi de commande en vitesse suivante :

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = v_3 p_{y_{joy}} \\ \frac{dh}{dt} = v_4 p_{x_{joy}} \end{cases}$$

où v_3 et v_4 sont des nombres réels strictement positifs, correspondant aux vitesses maximales de déplacement de l'outil dans chaque direction. Avec cette commande, nous avons choisi de faire monter l'outil sur la virole lorsque l'opérateur pousse le joystick vers l'avant, et de le faire descendre lorsqu'il tire le joystick. De même que pour le nettoyage du fond de cuve, le déplacement latéral du joystick fait tourner l'outil autour de l'axe de révolution de la cuve. Pour que l'inclinaison de la raclette soit adaptée au sens de parcours de la surface en trajectoire circulaire, quand $p_{y_{joy}} > 0$, $\gamma = +\gamma_o$ et quand $p_{y_{joy}} < 0$, $\gamma = -\gamma_o$ (cf. figure 4.18).

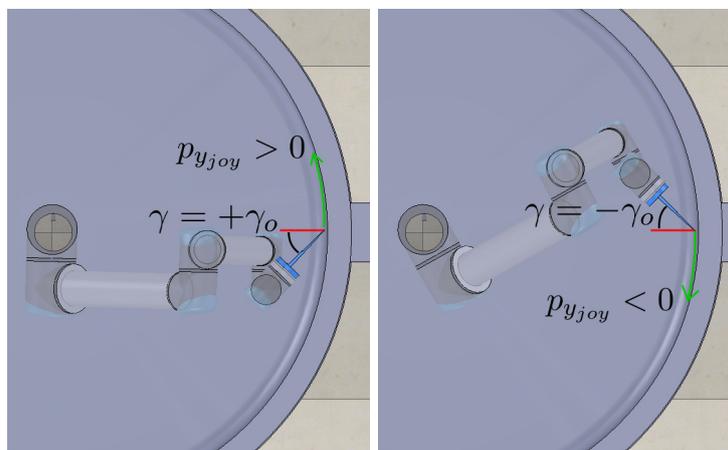


Figure 4.18 – Signe de l'angle γ en fonction du sens de déplacement circulaire sur la virole (flèche verte).

4.2.3 Réalisation des tests utilisateurs

Nous avons mené des tests utilisateurs avec les opérateurs sur cette maquette interactive pour évaluer leurs besoins pendant la réalisation des tâches de nettoyage en téléopération. Ces simulations participatives avaient également pour objectif d'évaluer la satisfaction des opérateurs vis-à-vis de la solution proposée. Le système cobotique simulé est illustré sur la figure 4.19.

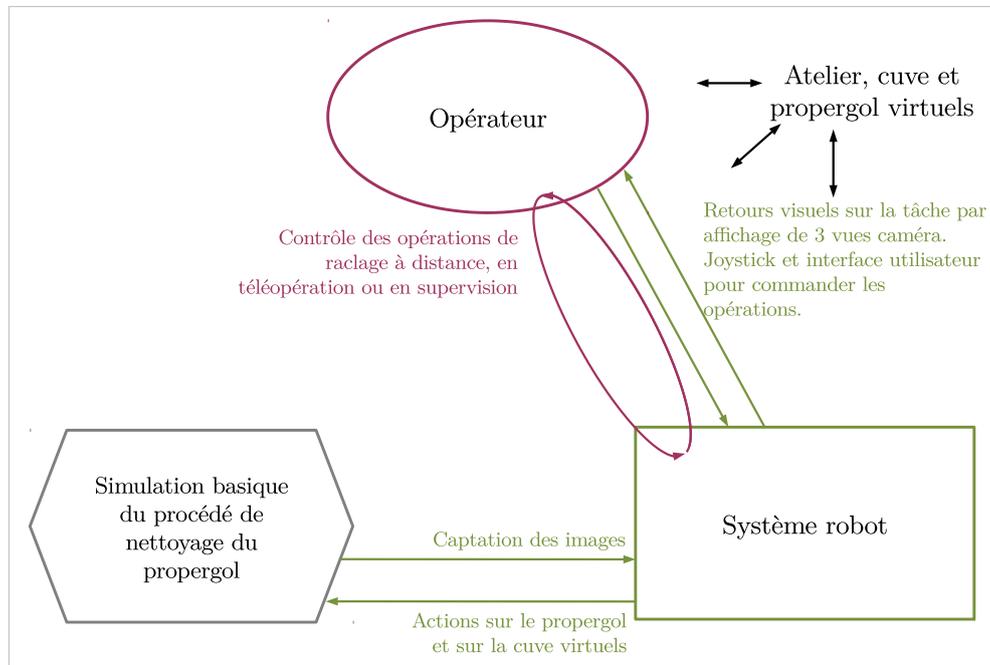


Figure 4.19 – Système cobotique de nettoyage des cuves avec activité de supervision et de téléopération du système robot simulés numériquement.

Les développements décrits précédemment sur les interfaces homme-robot, sur la commande du robot virtuel avec le joystick, sur l'utilisation des caméras virtuelles et sur la simulation du propergol et du procédé de nettoyage sont synthétisés sur notre modèle de système robot (figure 4.20), qui complète le modèle du système cobotique.

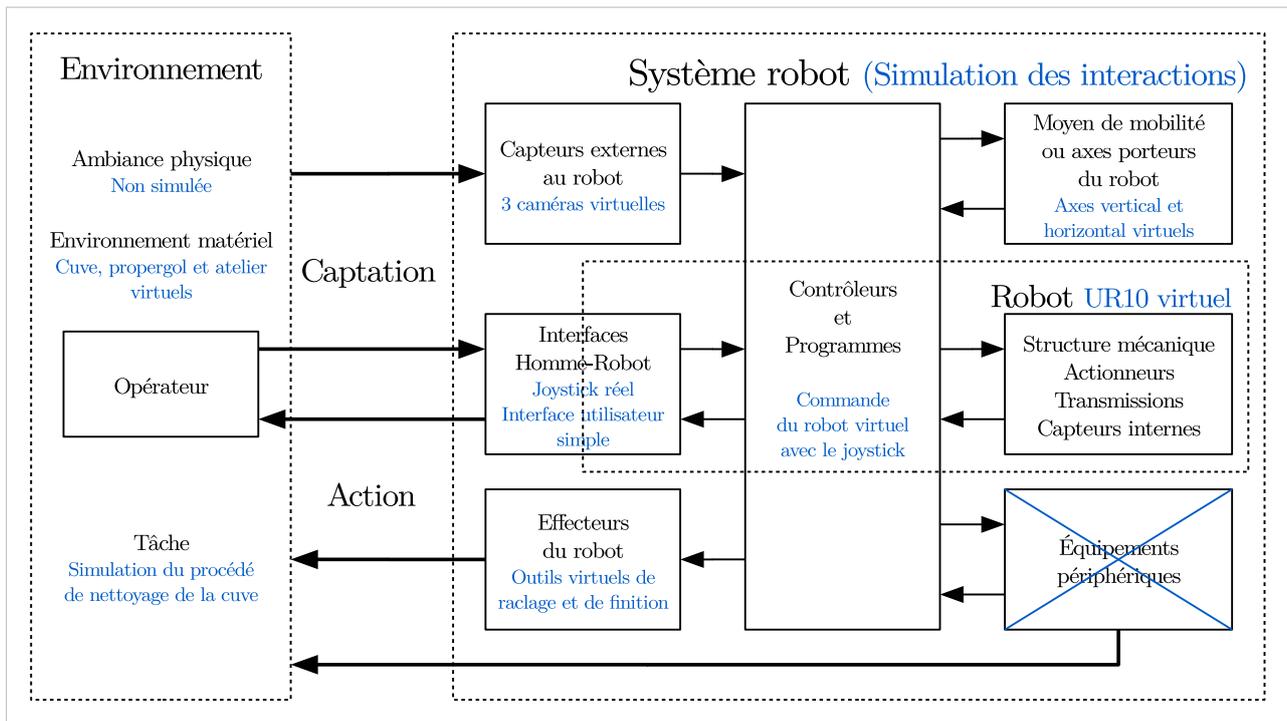


Figure 4.20 – Simulation du système robot de nettoyage des cuves et de son environnement pour l'évaluation de l'interaction avec les opérateurs. En noir, le modèle de base et, en bleu, les éléments simulés.

Les tests ont été conduits avec 8 opérateurs du nettoyage des cuves de Saint-Médard. Un seul opérateur était présent par test utilisateur (voir figure 4.21). Lors de chaque simulation participative, les objectifs du test, la solution cobotique et le principe de téléopération avec le joystick étaient d'abord présentés à l'opérateur. Le scénario de simulation était composé d'un cycle de raclage automatique supervisé et d'un nettoyage en téléopération.



Figure 4.21 – Situation de test pendant les simulations participatives.

Pour le premier cycle, une couche de propergol était simulée sur l'ensemble de la cuve. L'opérateur devait demander au robot de saisir la raclette via l'interface graphique, puis sélectionner la surface à nettoyer (virole ou fond) et lancer le cycle de raclage. L'opérateur devait alors vérifier en supervision le bon déroulé des opérations et la qualité de nettoyage, à travers les trois vues caméras affichées. Durant

le cycle, des traces étaient délibérément laissées sur certaines zones (voir figure 4.22) et l'opérateur devait indiquer à la fin des opérations s'il avait détecté l'anomalie.

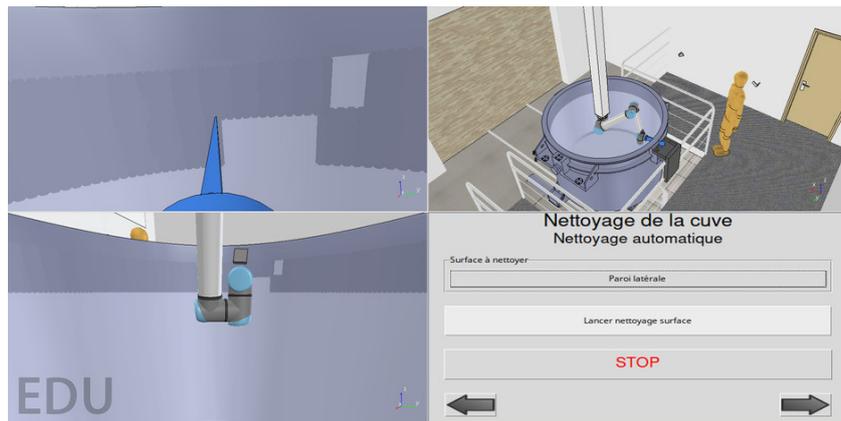


Figure 4.22 – Simulation de la supervision d'un cycle automatique de raclage, avec traces résiduelles de propergol. Trois vues sont issues des caméras virtuelles. La vue en bas à droite correspond à l'interface utilisateur.

Pour le mode téléopération, l'opérateur avait d'abord la possibilité de se familiariser avec les commandes du joystick en faisant des essais de nettoyage en téléopération de la cuve entièrement souillée de propergol (cf. figure 4.16). Ensuite, une cuve presque propre, avec des tâches résiduelles de propergol était présentée à l'opérateur qui devait les nettoyer en téléopération (voir figure 4.23). Cette opération avait pour but d'évaluer la facilité à se positionner dans la cuve et à nettoyer une surface spécifique.

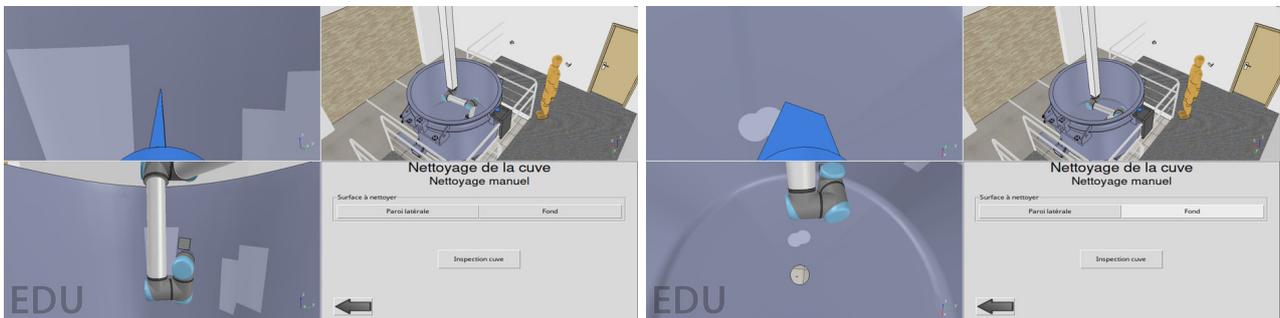


Figure 4.23 – Simulation d'opérations de nettoyage de traces résiduelles de propergol en téléopération : sur la virole, à gauche, et en fond de cuve, à droite.

Un bouton sur l'interface permettait à l'opérateur d'inspecter l'ensemble de la cuve et de repérer les éventuelles traces restantes en plaçant automatiquement le robot dans une position appropriée (cf. figure 4.24).

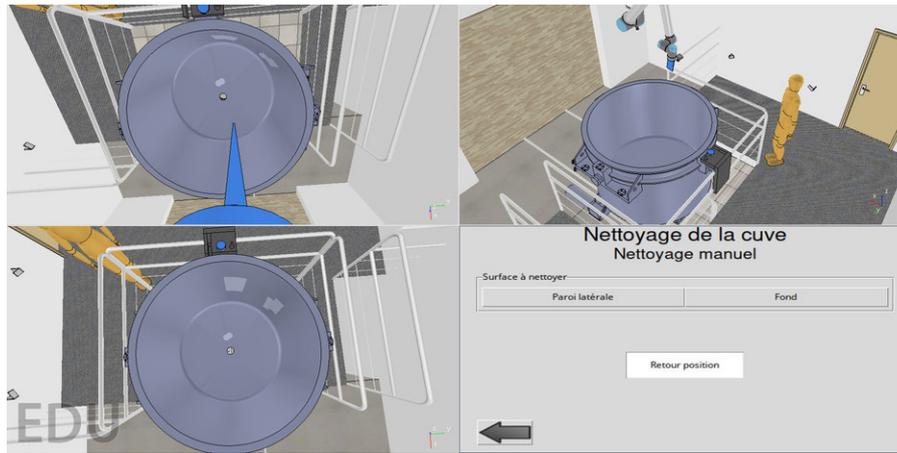


Figure 4.24 – Simulation d'une position d'inspection de la cuve en supervision.

En fin de simulation, les discussions avec l'opérateur avaient pour objectif d'évaluer l'adaptation du système à ses besoins pour réaliser la tâche, son acceptation générale du système, sa satisfaction globale vis-à-vis de l'activité proposée et la représentativité de la simulation.

Des questionnaires ont été réalisés et complétés par les opérateurs au début et à la fin de chaque test utilisateur pour évaluer plus en détail leur satisfaction [MS17]. Les résultats révèlent que les opérateurs sont globalement satisfaits par la solution proposée sur les situations de travail simulées. Les points d'amélioration ont été discutés avec eux et font partie des résultats listés ci-après. Les critères ayant permis l'évaluation de la satisfaction et des résultats plus détaillés sont fournis dans la thèse de Moulières-Seban.

4.2.4 Synthèse des résultats pour la conception

Les résultats qualitatifs issus des tests utilisateurs et des retours des opérateurs du poste de nettoyage des cuves de Saint-Médard lors des discussions sont les suivants :

- Les opérateurs ont manqué d'information sur l'état du robot. Par exemple, lorsque le robot était positionné automatiquement en face de la surface à nettoyer, les opérateurs ne savaient pas à quel moment ils pouvaient prendre la main avec le joystick.
- Pour le contrôle supervisé et la téléopération, les opérateurs étaient globalement satisfaits du retour visuel lors du nettoyage de la surface latérale.
- Plusieurs opérateurs ont été perturbés par le retour visuel lors des opérations de nettoyage en fond de cuve, particulièrement près de l'orifice central. La variation des postures du robot pendant le déplacement de l'effecteur, a une influence sur l'orientation de la vue des caméras placées sur le robot par rapport à l'outil.
- Pendant le nettoyage, les opérateurs se concentrent sur la vue outil. Le champ de vue de la caméra outil devrait être plus large pour donner une meilleure conscience de la situation aux opérateurs.
- Les opérateurs ont alerté que le propergol risquait d'adhérer à la raclette pendant les opérations. Le système devra permettre aux opérateurs de commander le nettoyage ou le changement des outils à tout moment pour conserver l'efficacité. La gestion du salissement des raclettes est discutée dans la section 4.4.1.
- Les opérateurs étaient parfois surpris par la rapidité des mouvements du robot lors des transitions automatiques. Lors du développement du système final, cette vitesse devra être adaptée aux exigences de sécurité de l'installation pyrotechnique et aux besoins des opérateurs.
- Les opérateurs ont jugé que le joystick permettait bien de réaliser les tâches en téléopération sur les situations de travail simulées. Ils ont averti que cela doit être validé en situation réelle de travail avec du propergol, car son comportement est plus incertain que celui simulé dans ce test utilisateur.

4.3 Réalisation d'un prototype

Les simulations participatives réalisés précédemment avec la maquette numérique possèdent des limites de représentativité des situations étudiées. Grâce à l'implication des opérateurs du poste de nettoyage des cuves de Saint-Médard, cette simulation a donné des orientations pour la conception et a permis de renforcer les hypothèses établies. Cependant, le passage par des simulations plus représentatives est nécessaire pour valider nos hypothèses de conception. Les limites du modèle utilisé sont notamment les suivantes :

- Manque de représentativité de la quantité de propergol, de son comportement rhéologique (viscoélasticité, pégosité) et donc du procédé de nettoyage.
- Représentativité limitée du modèle dynamique du robot (masses, inertie, charge utile et réaction aux forces) et de son contrôle.
- Avec pour conséquence une représentativité limitée des interactions homme-robot.

Pour avancer dans la conception du système cobotique il est nécessaire de dépasser les limites des modèles numériques. Nous avons réalisé un prototype afin d'évaluer les hypothèses de conception dans des conditions plus proches des situations réelles de travail.

Suite aux tests utilisateurs précédents, nous avons retenu les hypothèses de conception suivantes pour le système :

- Un mode de fonctionnement où l'opérateur supervise le robot réalisant des cycles automatiques permet de détacher et évacuer efficacement la majorité du produit de la cuve.
- Pour assurer la qualité de nettoyage des cuves, un mode téléopération avec un dispositif de type joystick pourrait laisser suffisamment de marge de manœuvre aux opérateurs pour prendre en charge les situations de variabilité. L'utilisation d'un bras haptique reste à évaluer. Moins de 6 degrés de liberté seraient nécessaires pour réaliser les tâches de nettoyage en téléopération. Le nombre de degrés de liberté nécessaire et suffisant est à valider.
- 3 vues caméras avec un champ de vue adapté donnent les informations visuelles nécessaires pour gérer les diverses situations au poste : une vue atelier, une vue cuve et une vue outil.
- L'interface de supervision²² permet de contrôler les opérations en supervision. Elle donne les informations complémentaires aux vues caméras et adaptées aux différents modes de contrôle²³.
- La nécessité du retour d'effort pour la téléopération du nettoyage est à démontrer.

Cette nouvelle série d'hypothèses de conception globales sur le système cobotique est synthétisée sur la figure 4.25.

22. Définie dans la thèse de Moulières-Seban [MS17].

23. Téléopération et supervision.

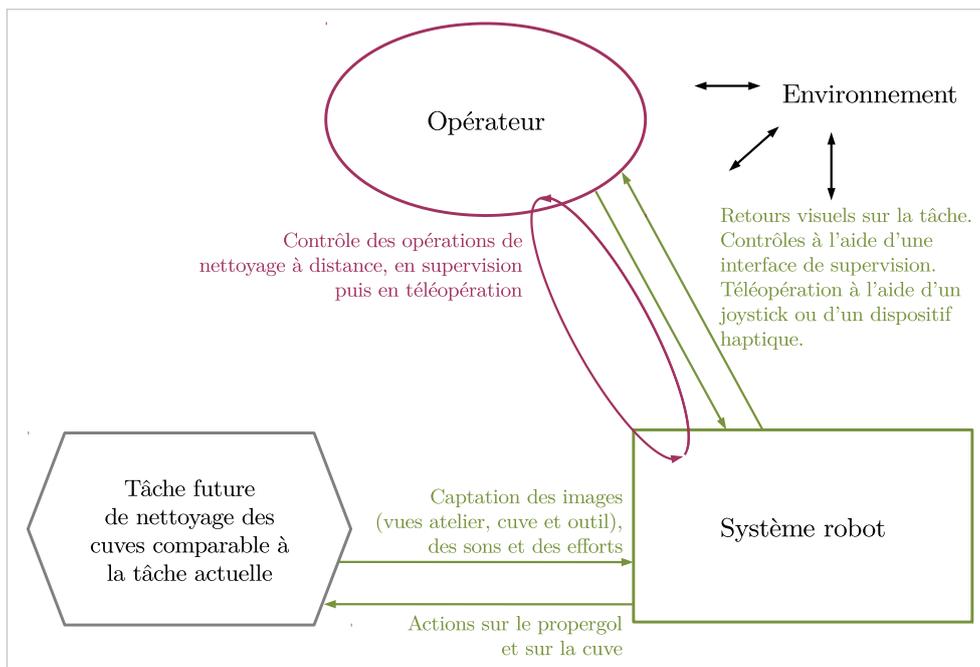


Figure 4.25 – Visualisation des hypothèses de conception sur le système cobotique de nettoyage des cuves, avant la réalisation du prototype.

Le détail des hypothèses de conception sur le système robot est présenté sur la figure 4.26.

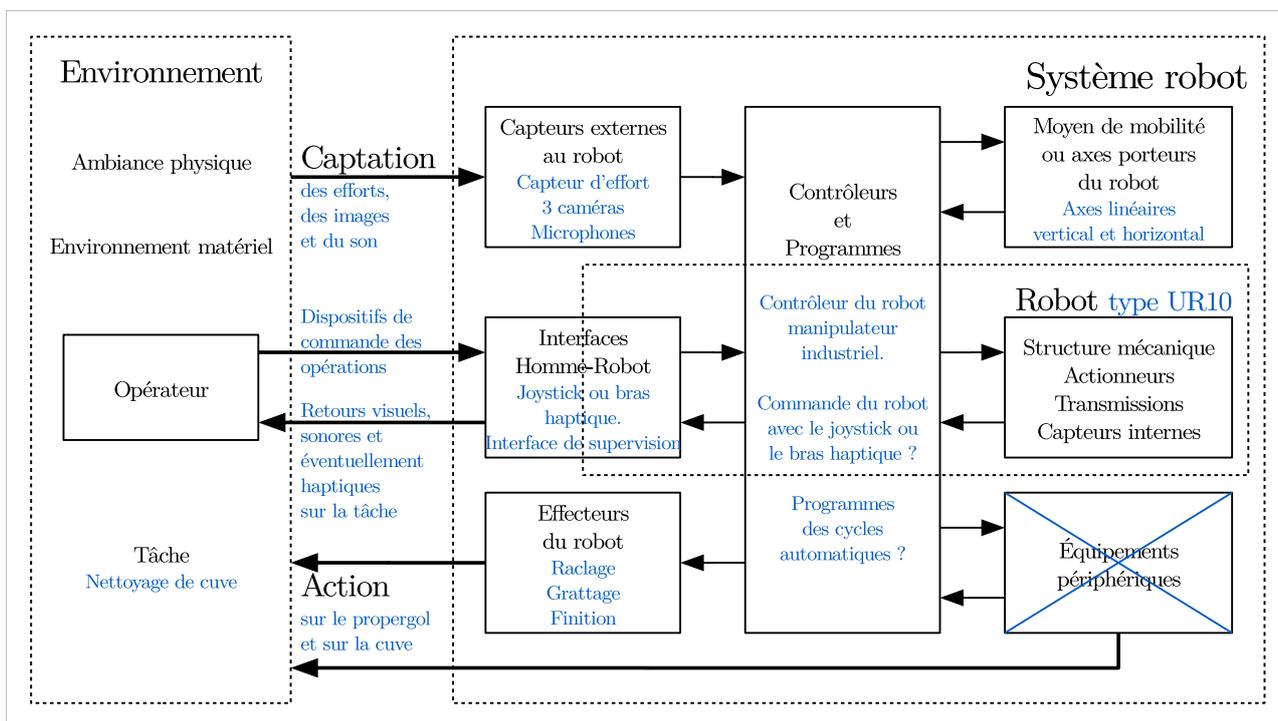


Figure 4.26 – Évolution des hypothèses de conception sur le système robot de nettoyage des cuves suite aux simulations participatives des interactions homme-robot. En noir, le modèle de base et, en bleu, les nouvelles hypothèses de conception.

Les simulations participatives précédentes n'ont pas permis aux opérateurs d'évaluer l'utilisation d'un bras haptique pour commander le robot. Le choix entre un joystick ou un dispositif haptique n'est donc pas déterminé. Une interface utilisateur très simplifiée a été réalisée pour les simulations participatives précédentes. L'interface de supervision doit encore être précisée. Les phases de concep-

tion précédentes ont montré qu'un robot manipulateur industriel aux dimensions de l'UR10 est capable d'accéder aux surfaces de la cuve avec les outils de nettoyage. Le modèle de robot choisi devra également avoir une charge utile suffisante pour nettoyer du propergol. Le contrôleur du robot dépendra du modèle de robot industriel choisi et sera probablement fourni par le constructeur. Dans les phases de conception précédentes, nous avons développé la commande en vitesse du robot UR10 virtuel avec un joystick et des trajectoires simplifiées pour les cycles automatiques supervisés par l'opérateur. À ce stade, les programmes du robot ne sont pas encore complètement développés et la commande du robot avec le bras haptique reste à définir. Enfin, l'intérêt du retour haptique aux opérateurs est à évaluer.

Étant donné le contexte industriel de ces travaux de thèse, en plus de l'évaluation des hypothèses de conception, la réalisation d'un prototype avait pour objectif de démontrer la faisabilité de nettoyer les cuves de propergol avec la solution proposée et de fournir en sortie les spécifications techniques pour l'industrialisation du système.

N'ayant pas les compétences et le matériel en interne pour réaliser un prototype répondant à ses objectifs, nous nous sommes dirigés vers des partenaires. Nous avons choisi de collaborer avec le CEA Tech pour réaliser le prototype. Nous les avons choisi pour leur expérience conséquente dans la téléopération et parce qu'ils étaient volontaires pour intégrer notre binôme de doctorants dans le développement du prototype.

4.3.1 Matériel et architecture logicielle

Le matériel suivant a été mis en œuvre afin de tester nos hypothèses de conception :

- Robot industriel 6 axes en montage plafond sur une potence : Stäubli TX90XL (cf. figure 4.27).
- Capteur d'effort 6 axes en bout d'effecteur : ATI DELTA 660-60 (jusqu'à 660 N et 60 Nm).
- Réplique de cuve en inox avec des dimensions proches de la cuve de Saint-Médard. Elle est composée de deux parties qui peuvent être assemblées : fond de cuve et virole.
- Support de cuve à hauteur ajustable en acier.
- Outils effecteurs :
 - Raclage : plaque en aluminium biseauté entourée de 3 couches de chiffon (voir figure 4.28).
 - Grattage : éponge abrasive montée sur support en mousse (cf. figure 4.29).
 - Finition : chiffons montés sur support en mousse (cf. figure 4.29).
- Dispositifs de commande :
 - Joystick : Speedlink Dark Tornado, 2 axes.
 - Bras haptique : Haption Virtuose 6D TAO (retour d'effort sur 6 degrés de liberté, espace de travail en translation de 1300 mm x 948 mm x 1080 mm, effort max de 34 N et 9,5 N en continu).
- Caméras :
 - Très grand angle : GoPro Hero4 Black avec une résolution maximale de 1920x1080 pixels et un champ de vision diagonal de 133,6°.
 - Grand angle : Logitech Webcam C930e avec une résolution maximale de 1920x1080 pixels et un champ de vision diagonal de 90°.
 - Classique : Logitech HD Pro Webcam C920 avec une résolution maximale de 1920x1080 pixels et un champ de vision diagonal de 78°.
- Produit inerte : 7 kg, viscosité 2000-3000 Pa.s.

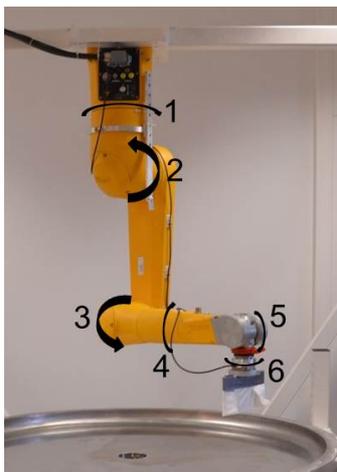


Figure 4.27 – Représentation des six axes du robot Staubli TX90XL.

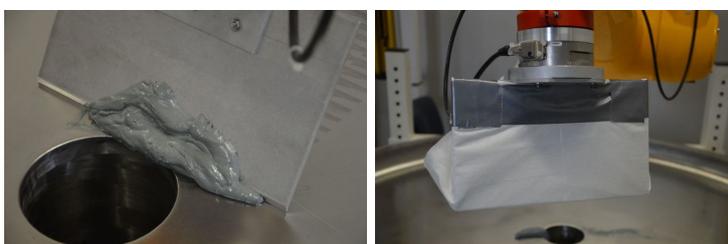


Figure 4.28 – Raclette (à gauche), avec chiffon (à droite).



Figure 4.29 – Effecteurs de grattage (à gauche) et de finition (à droite).

Le robot Staubli TX90XL possède des dimensions proches du robot UR10 évalué dans les phases de conception précédentes. En effet, il a une portée de 1,45 m contre 1,3 m pour l'UR10. Il a une charge utile maximale théorique d'environ 9 kg. Il a été choisi car sa téléopération avec un bras haptique était déjà développée par le CEA Tech. Ce choix a été validé avec le groupe de travail ArianeGroup.

Nous avons décidé d'intégrer un bras haptique dans ce prototype pour évaluer le nombre de degrés de liberté nécessaires pour téléopérer le nettoyage des cuves. En effet, avec un bras haptique il est possible de piloter jusqu'à 6 DDL, là où le joystick est limité à 2 DDL. Il permet également d'évaluer l'apport du retour d'effort. Lors du choix des dispositifs de commande, plusieurs bras haptiques ont été considérés. Le bras Haption Virtuose 6D TAO était déjà implémenté par le CEA Tech dans leur architecture logicielle. Nous avons également à disposition un Geomagic Touch, que nous avons choisi sur un autre projet pour son rapport performance/coût intéressant. Nous avons ainsi envisagé de l'implémenter sur le prototype pour comparer l'ergonomie, l'utilisabilité et l'efficacité des différents bras haptiques sur notre application. Il est cependant apparu que le matériel du Geomagic Touch ne permettait pas une rapidité de communication suffisante pour assurer la stabilité de la commande en téléopération robotique, avec l'architecture logicielle à disposition [GRMA10]. Le Virtuose 6D TAO présentait également l'avantage de posséder un espace de travail plus grand permettant d'augmenter l'efficacité des opérations en réduisant le nombre de manœuvres nécessaires, de pouvoir rendre des

efforts plus élevés et d'être déjà en place sur des applications industrielles [GRDM10]. Seul le bras haptique d'Haption a donc finalement été intégré au prototype.

Pour le développement des outils du prototype, nous avons choisi de réaliser des outils répliquant ceux utilisés par les opérateurs. Pour la finition nous avons envisagé d'utiliser un outil de type polisseuse, cependant sa vitesse de rotation et la friction pourraient générer des échauffements introduisant des risques pyrotechniques. Nous avons donc préféré repartir de l'existant pour évaluer un fonctionnement qui sera plus facile à qualifier lors de l'analyse des risques pyrotechniques du système final.

Dans le cadre de ce prototype, nous n'avons pas mis en œuvre de modèle de l'atelier environnant, l'objectif étant d'évaluer principalement le procédé de nettoyage à l'aide d'un système robot et la collaboration homme-robot en fonctionnement. Ainsi, nous n'avons pas mis de caméra pour la vue atelier, et avons retenu deux caméras pour la vue globale de la cuve et pour la vue outil. Nous n'avons pas utilisé d'axe linéaire motorisé; le robot est monté sur une potence fixe.

Pour donner une vision globale du prototype et des interactions entre ses différents composants, la figure 4.30 illustre comment l'ensemble de ces éléments se positionnent selon notre modèle de système robot.

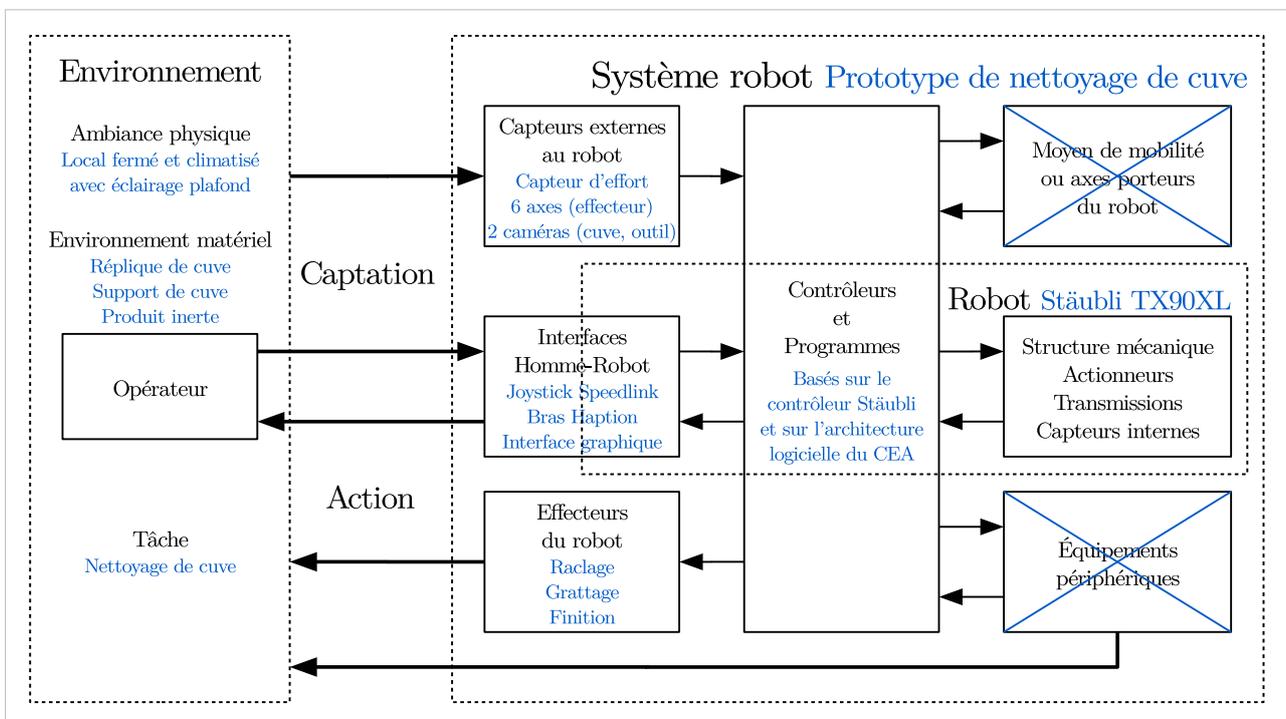


Figure 4.30 – Positionnement des éléments du prototype de nettoyage des cuves suivant notre modèle de système robot. En noir, le modèle de base et, en bleu, les éléments du prototype correspondants.

Le matériel et le prototype intégré sur la plateforme du CEA Tech sont illustrés sur la figure 4.31.



Figure 4.31 – Photos du prototype de nettoyage des cuves et du poste de commande.

L'architecture logicielle du CEA Tech permettant le contrôle en téléopération du robot est schématisé sur la figure 4.32. Elle a servi de base au développement du prototype de nettoyage des cuves.

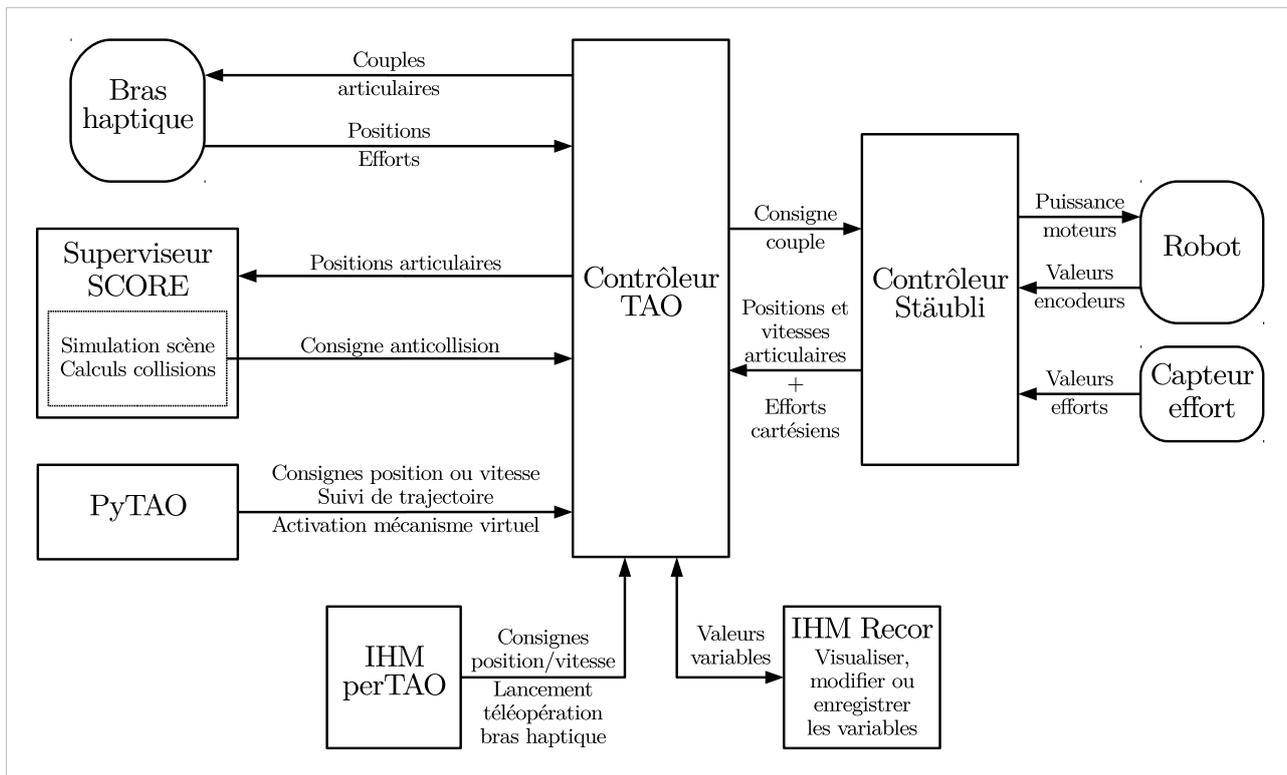


Figure 4.32 – Architecture logicielle du contrôle en téléopération du robot du CEA Tech, servant de base au développement du prototype.

Le contrôleur Stäubli sert à commander le robot en couple, les consignes de couple étant envoyées par le contrôleur de TAO du CEA à une fréquence de 500 Hz. Le contrôleur de TAO calcule les asservissements en position, vitesse et effort du robot manipulateur. Il permet de piloter le robot en position, en vitesse (avec des consignes articulaires ou cartésiennes) ou en téléopération avec un bras maître à retour d'effort. Ce contrôleur permet également de simuler des mécanismes virtuels pour commander le robot en mode hybride force/position. Le superviseur SCORE du CEA contient un moteur physique 3D et permet de simuler des scènes virtuelles de manière synchronisée avec les opérations réelles. Il est ainsi possible de calculer et éviter les collisions en temps réel. PyTAO est une bibliothèque logicielle Python permettant d'envoyer des consignes au contrôleur de TAO. Elle sert de support à la programmation des enchaînements des mouvements et des actions du robot. Enfin, les interfaces homme-machine (IHM) perTAO et Recor permettent respectivement à un utilisateur d'envoyer des consignes ou de modifier les modes de pilotage du robot, et de visualiser et enregistrer les valeurs des variables du contrôleur de TAO.

4.3.2 Évaluation du procédé de nettoyage automatisé

Un des objectifs de ce prototype est d'évaluer la faisabilité de réaliser à l'aide du système robot des cycles automatiques, supervisés par l'opérateur, pour détacher et évacuer la majorité du propergol de la cuve. Pour cela nous avons défini des cycles pour les différentes étapes des opérations et nous avons réalisé des essais expérimentaux des procédés de nettoyage.

Le contenu détaillé de cette section est décrit dans une annexe confidentielle. Les principaux résultats sont les suivants :

- Les essais ont mis en évidence les paramètres influents des procédés de raclage et de grattage pour optimiser la qualité du nettoyage.

- Nous avons montré qu'il était possible de retirer la majorité du propergol présent initialement en fond de cuve avec un cycle automatique de raclage.
- Les essais ont également confirmé la nécessité des phases de grattage et de finition.
- Pour ces phases, l'intervention de l'opérateur semble effectivement nécessaire. Grâce à ces essais, nous avons validé la pertinence d'un mode téléopération.

4.3.3 Développement du prototype pour les tests utilisateurs

Après avoir évalué le procédé de nettoyage robotisé, nous avons poursuivi le développement du prototype pour permettre la collaboration homme-robot. Pour cela, nous avons d'abord étudié le placement de caméras pour fournir aux opérateurs des retours visuels sur la tâche en supervision et en téléopération. Nous avons ensuite développé le pilotage du robot en téléopération avec le joystick et le bras haptique. Enfin, une maquette non fonctionnelle d'interface graphique de supervision a été construite pour évaluer les commandes et les retours d'informations complémentaires dont auront besoin les opérateurs tout au long du futur cycle de nettoyage. Ces éléments sont détaillés dans les sections suivantes.

4.3.3.1 Placement des caméras pour la supervision et la téléopération

Suite aux tests utilisateurs précédents avec la maquette numérique interactive, nous avons retenu le besoin de trois caméras pour superviser et téléopérer le nettoyage des cuves depuis un poste de commande hors de l'atelier. Ces caméras doivent fournir une vue globale de l'atelier, une vue globale de la cuve et du positionnement du robot, et une vue de la qualité du nettoyage autour de l'outil. L'atelier complet n'est pas représenté dans ce prototype. Nous nous sommes donc restreint ici à l'évaluation des deux vues cuve et outil, puisque la troisième vue vise essentiellement à inspecter les événements au sein de l'atelier. Les vues cuve et outil doivent suffire à percevoir l'ensemble des mouvements du robot dans la cuve.

Pour étudier les retours visuels sur le prototype, nous avons évalué le placement des caméras sur différentes positions fixes ou sur le robot. Trois caméras avec différents angles ont été utilisées pour les essais :

- très grand angle : GoPro Hero4 Black avec un champ de vision diagonal de $133,6^\circ$,
- grand angle : Logitech Webcam C930e avec un champ de vision diagonal de 90° ,
- classique : Logitech HD Pro Webcam C920 avec un champ de vision diagonal de 78° .

Les deux webcam Logitech ont été connectées à un écran pour afficher les retours visuels en temps réel (voir figure 4.33). Les vidéos de ces caméras ont également été enregistrées. La GoPro Hero4 qui possède le plus grand angle ne permettant pas de donner un retour visuel en direct sur les écrans, nous avons analysé les vidéos en différé en les comparant aux enregistrements des webcams pour évaluer l'apport d'un angle plus grand.

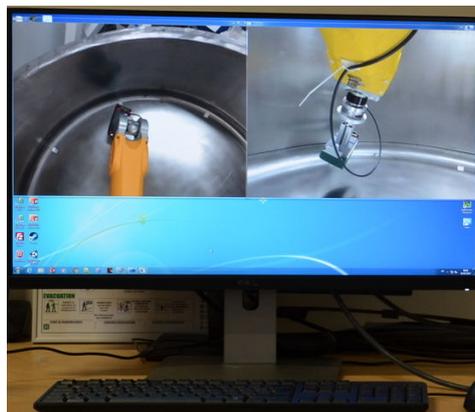


Figure 4.33 – Affichage des retours visuels des caméras sur l'écran du poste de commande.

4.3. Réalisation d'un prototype

Nous avons réalisé une série d'essais en modifiant de manière expérimentale le placement des caméras lors d'un nouvel essai en fonction des résultats obtenus aux essais précédents. Les configurations de placement des caméras à chaque essai sont synthétisées dans le tableau 4.5 et sont illustrées sur la figure 4.34. Le numéro de l'axe du robot indiqué dans le tableau 4.5 correspond aux numéros indiqués précédemment sur la figure 4.27. Une caméra placée sur l'axe n (où $n \in [1, 6]$) du robot bouge en même temps que l'axe n , mais n'est pas influencée par la rotation des axes $[n + 1, 6]$.

Essai	Vue globale cuve	Vue proche outil
1	Axe 1 : classique	Axe 3 (dessus) : grand angle
2	Axe 1 déporté : classique	Axe 3 (dessous) : grand angle
3	Axe 1 déporté : très grand angle	Axe 3 (dessous) : grand angle mieux dirigé vers virole
4	Axe 1 : très grand angle	
5		Axe 5 : grand angle
6	Potence : classique à gauche + grand angle à droite	Axe 3 (dessous) : très grand angle

Tableau 4.5 – Configurations des essais de placement des caméras.

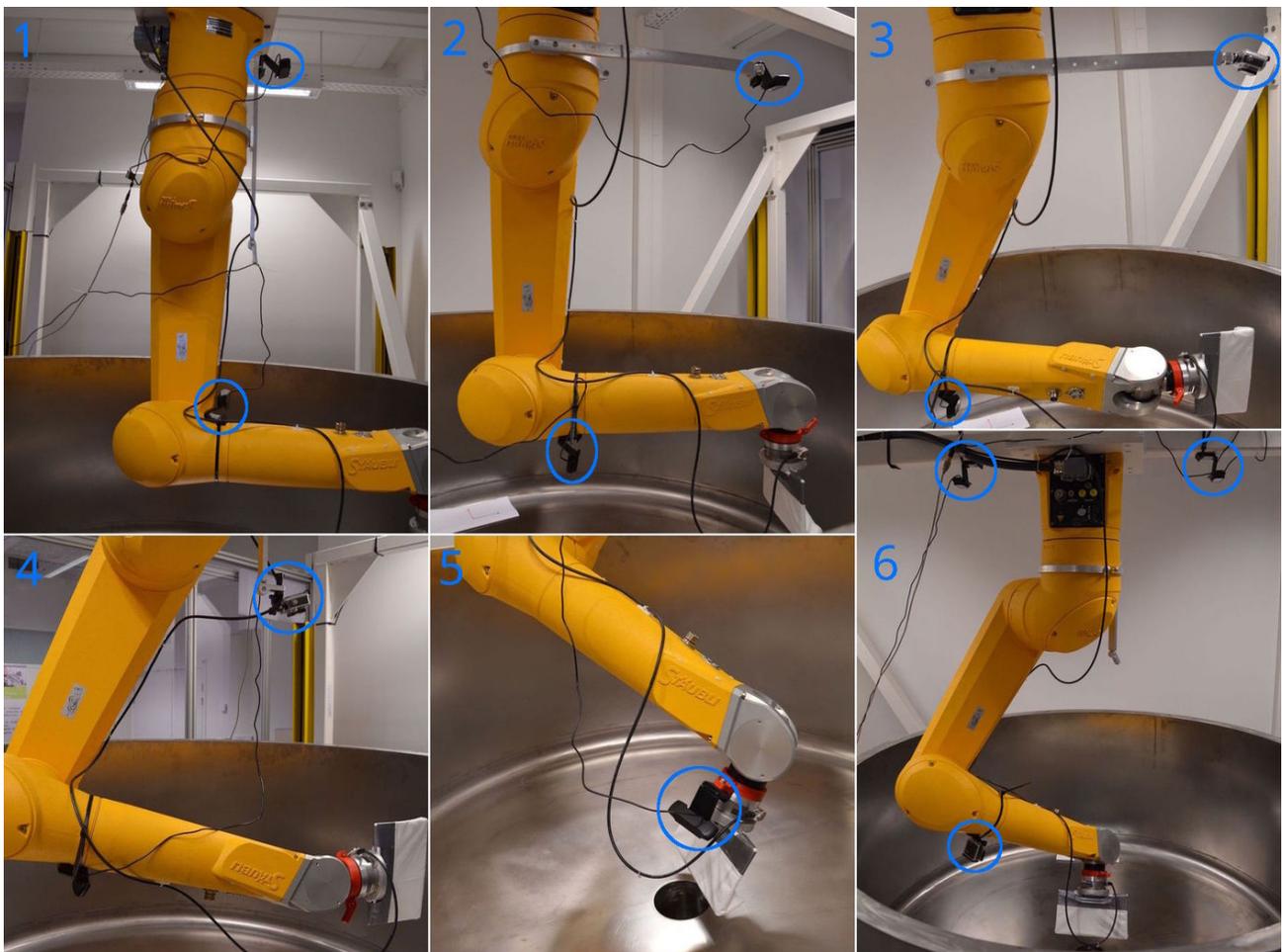


Figure 4.34 – Photos des configurations de placement des caméras. Le numéro de l'essai est indiqué en haut à gauche de chaque image et les caméras sont entourées en bleu.

Pour la vue globale de la cuve, nous avons évalué le placement des caméras sur l'axe 1 du robot et sur la potence fixe supportant le robot. Ces positions en hauteur ont été choisies car elles donnent du recul par rapport au robot et à l'outil, permettant de maximiser la portion de la cuve observable. Le placement a été effectué de manière à offrir une vue de dessus dégagée sur les opérations. Lors des essais 1 à 4, nous avons rattaché la caméra fournissant cette vue à l'axe 1 du robot pour centrer la vue sur la portion de la cuve occupée par le robot et son effecteur. Sur les essais 2 et 3, nous avons déporté

la caméra par rapport à l'axe 1 pour placer la vue au-dessus de l'outil et faciliter l'estimation de la distance entre l'outil et la virole. Lors de l'essai 6, les deux webcams ont été placées sur la potence fixe, de part et d'autre de la base du robot, de manière à avoir des vues de dessus complémentaires captant l'entièreté de la cuve.

Pour la vue outil, nous avons évalué le placement des caméras sur les axes 3 et 5 du robot, pour avoir une vue rapprochée de l'outil et des surfaces de la cuve. Une interface mécanique a été réalisée pour placer la "webcam grand angle" sur l'axe 5, au plus proche de l'outil. Pour ces essais, nous n'avons pas pu positionner de caméra au niveau de l'axe 6 du fait du faible recul rendant difficile de visualiser la totalité de la raclette. Lors d'essais préliminaires nous avons évalué le placement d'une caméra sur l'axe 4 du robot. Nous avons éliminé ce choix pour les essais décrits ici car les rotations fréquentes de l'axe 4 du robot rendait difficile le suivi des opérations. En particulier, sur les trajectoires d'outils en fond de cuve, en fonction des rotations de l'axe 4 du robot, l'outil sortait parfois du champ de vue de la caméra. Nous avons donc choisi d'évaluer des caméras placées sur l'axe 3, permettant de conserver une vue plus cohérente de la scène quelles que soient les postures du robot.

Nous avons évalué le positionnement des caméras selon les critères suivants :

- L'opérateur doit avoir une vision globale de la virole et du fond de cuve et doit pouvoir se repérer facilement dans la cuve.
- Lors des opérations sur la virole, l'opérateur doit pouvoir inspecter la surface de passage de l'outil en ayant une vue proche de l'outil.
- Lors des opérations sur le fond de cuve, l'opérateur doit pouvoir inspecter la surface de passage de l'outil en ayant une vue proche de l'outil.
- Le nombre de vues caméras est à minimiser pour réduire la quantité d'information que l'opérateur doit gérer.
- Les caméras ne doivent pas gêner les mouvements du robot ou être gênées lors des mouvements robot.
- En téléopération, l'opérateur doit avoir un repère de vision cohérent avec le repère de commande.
- En téléopération et en supervision, les rotations perturbantes des vues caméra doivent être limitées.

Pour réaliser cette évaluation, nous avons défini un ensemble de trajectoires d'outils couvrant les différentes portions du fond de cuve et de la virole. Afin de limiter la durée de chaque essai et la quantité de données à comparer, nous avons effectué quatre passes radiales en fond de cuve, réparties sur quatre quarts différents. Sur la virole, nous avons effectué une succession de trois trajectoires, répétées sur quatre portions différentes : une trajectoire circulaire en bas de virole dans le sens antihoraire, puis une trajectoire verticale pour se déplacer vers le haut de la virole, et enfin une trajectoire circulaire en haut de virole dans le sens horaire. Ces trajectoires sont représentées sur la figure 4.35.

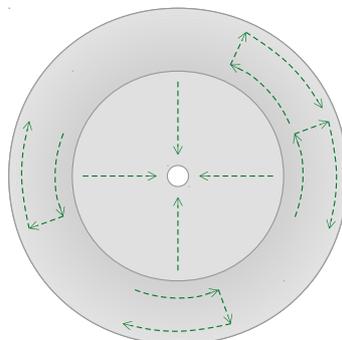


Figure 4.35 – Trajectoires de l'effecteur du robot sur les parois de la cuve, vue de dessus. La virole est représentée autour du fond, suivant une perspective linéaire.

Les différentes configurations de placement des caméras ont été évaluées suivant ces mêmes trajectoires. Pour cela les mouvements du robot ont été programmés dans un script Python en utilisant la bibliothèque logicielle PyTAO.

Résultats des essais

Pour illustrer la comparaison des vues caméras à chaque essai, nous présentons ici des extraits des vidéos capturées. Les extraits ont été pris sur six positions caractéristiques des trajectoires réalisées, sur différentes portions de la cuve (voir figure 4.36) :

1. En début de trajectoire circulaire en bas de virole.
2. En fin de trajectoire circulaire en bas de virole.
3. En début de trajectoire circulaire en haut de virole.
4. En fin de trajectoire circulaire en haut de virole.
5. En début de trajectoire radiale sur le fond de cuve.
6. En fin de trajectoire radiale sur le fond de cuve.

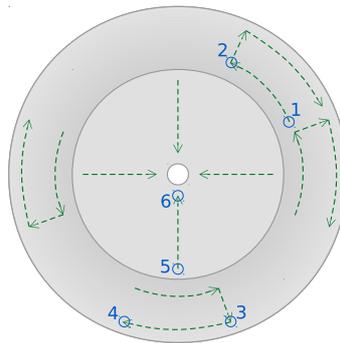


Figure 4.36 – Position des captures d'écran sur les trajectoires d'essai.

Pour la "vue cuve", les captures sont regroupées dans le tableau 4.6. Chaque ligne correspond à un essai et chaque colonne à une des six positions de capture définies sur la figure 4.36.

Essai	Position de capture photo					
	1	2	3	4	5	6
1						
2						
3						
4						
6						

Tableau 4.6 – Extrait des vues de la "caméra cuve" à chaque essai sur les six positions définies.

Le placement de la "caméra classique" sur l'axe 1 du robot est étudié lors des essais 1 et 2. Lors de l'essai 1, son placement au plus haut et proche de l'axe du robot a permis de visualiser la position de l'outil sur l'ensemble des trajectoires réalisées sur la virole et sur le fond de cuve. Ce placement, permettant de voir presque la moitié de la cuve, donne une bonne représentation de l'état de propreté de la cuve autour de la position de l'outil. Cependant puisque la cuve est cylindrique et que la vue tourne avec le robot autour de son axe de révolution, il est difficile de se situer dans la cuve sans repère visuel fixe.

Par ailleurs, ce premier essai montre que le placement de la "caméra outil" permet difficilement d'estimer la distance entre l'outil et la virole (voir tableau 4.7), ce qui peut être problématique pour le positionnement de l'outil en téléopération par l'opérateur. La vue de dessus de la "caméra cuve" permet d'avoir une meilleure estimation de cette distance. Lors de l'essai 2, nous avons souhaité évaluer si la modification du placement de la "caméra cuve" sur l'axe 1 pouvait améliorer l'estimation de cette distance. Pour cela nous avons déporté la caméra par rapport à l'axe 1 du robot pour la positionner au-dessus de l'outil lors du nettoyage de la virole. Cet essai montre que l'apport de cette position déportée pour visualiser la distance entre l'outil et la virole est faible. Le placement utilisé lors de l'essai 1 pour la "vue cuve" peut être suffisant. De plus, lors de l'essai 2, le champ de vision limité de la "caméra classique" ne permettait pas de voir l'outil lorsqu'il était proche de l'orifice du fond de cuve.

Pour l'essai 3, nous avons remplacé la "caméra classique" par la "caméra très grand angle", toujours en position déportée sur l'axe 1. Comme nous pouvons le voir dans le tableau 4.6, sur l'ensemble des trajectoires réalisées la caméra offrait un affichage complet de la cuve, permettant de visualiser la position de l'outil en tout point. Un marqueur visuel fixe sur la cuve suffit ainsi pour repérer la position du robot autour de l'axe de révolution de la cuve, puisqu'il reste en permanence dans le champ de vision de la caméra. Pour ces essais sans produit le marqueur a été placé en fond de cuve, de manière plus générale il pourrait être placé sur le haut de la virole. Avec cette vue de dessus il peut être cependant difficile d'estimer la position en hauteur de l'outil, notamment lors du nettoyage de la virole.

Lors de l'essai 4, nous avons placé la "caméra très grand angle" au plus bas et proche de l'axe 1 du robot, en l'orientant légèrement vers la virole pour améliorer la visualisation de la position de l'outil sur la hauteur de la paroi latérale. Nous n'avons pas placé la caméra plus haut sur l'axe 1 du robot car le corps du robot occupait alors une grande portion de la partie basse de la vue. Cette position de la caméra offre un affichage de plus de la moitié de la surface de la cuve et permet de voir l'outil sur l'ensemble des trajectoires sur la virole et le fond de cuve. Elle permet effectivement d'améliorer la visualisation de la position en hauteur de l'outil sur la virole. Cependant, le manque de l'affichage complet de la cuve rend plus difficile le repérage dans la cuve puisque le repère visuel fixe n'est pas présent en permanence dans le champ de vision de la caméra.

Enfin, pour l'essai 6 nous avons disposé les caméras "classique" et "grand angle" sur la potence du robot, de part et d'autre de sa base, pour avoir deux vues complémentaires de la cuve. Le champ de vision plus faible de la "caméra classique" n'a pas permis de visualiser l'outil lorsqu'il est placé à la frontière entre les deux vues. Sur les autres portions des trajectoires, la combinaison des deux caméras a permis de visualiser les positions du robot et de l'outil avec une référence fixe, sans avoir besoin d'un marqueur visuel sur la cuve. Cependant, même si nous disposions de deux caméras identiques, la jonction entre les deux vues serait difficile à gérer du fait du placement des caméras de part et d'autre de la base du robot. Cette configuration nécessiterait plus de matériel puisque deux caméras sont nécessaires pour la "vue cuve" et l'opérateur devrait gérer les informations provenant d'un écran supplémentaire. Notons également que ce placement fixe des caméras implique une implémentation différente de la commande du robot en téléopération par rapport à l'utilisation d'une caméra se déplaçant avec l'axe 1 du robot.

Dans toutes ces positions avec une vue d'en haut, le corps du robot masque certaines portions de la cuve. Lors du déplacement de l'outil selon des trajectoires radiales en fond de cuve, ces vues ne permettent pas de visualiser la présence de produit sur la surface entre l'outil et l'orifice central.

La "vue outil" doit permettre d'afficher des informations complémentaires à la "vue cuve". Les captures prises de la "caméra outil" pendant les essais sont regroupées dans le tableau 4.7. Chaque ligne correspond à un essai et chaque colonne à une des six positions de capture définies sur la figure 4.36.

Essai	Position de capture photo					
	1	2	3	4	5	6
1						
2						
3						
5						
6						

Tableau 4.7 – Extrait des vues de la "caméra outil" à chaque essai sur les six positions définies.

Le positionnement de la "caméra grand angle" sur l'axe 3 du robot pour la "vue outil" est étudié avec les essais 1 à 3. Lors du premier essai, le placement de la "caméra outil" en dessus de l'axe 3 offre une visualisation satisfaisante du passage de l'outil sur la virole mais ne permet pas de voir l'outil pendant le nettoyage du fond de cuve. De même qu'avec les vues de dessus analysées pour la "vue cuve", le corps du robot masque les portions du fond de cuve situées entre l'outil et l'orifice central. L'opérateur ne pourrait donc pas inspecter l'état de propreté du fond de cuve autour de l'outil, ni réguler la position de l'effecteur en fonction des traces restantes en téléopération.

Pour le deuxième essai, nous avons placé la "caméra outil" en dessous de l'axe 3 en centrant la vue sur l'outil en fond de cuve. Ce positionnement offre une bonne visualisation de l'outil et des alentours lors du nettoyage du fond de cuve. Cependant, cette orientation de la caméra n'offre qu'une vue partielle de l'outil lors du nettoyage de la virole.

Lors de l'essai 3, nous avons laissé la "caméra outil" en dessous de l'axe 3 et l'avons orienté pour voir entièrement l'outil à la fois lors du nettoyage de la virole et du fond de cuve. L'analyse de la vidéo de la caméra sur l'ensemble des trajectoires montre que dans certaines positions l'outil est affiché sur l'écran en bordure de la vue. Le champ de vision de la "caméra grand angle" est insuffisant pour observer les surfaces autour de l'outil dans ces positions. Lors du nettoyage de la virole, cela serait gênant pour l'opérateur car il pourrait difficilement situer l'outil par rapport aux traces potentiellement présentes au-dessus. Lors du nettoyage du fond de cuve, la vue ne permet pas d'observer la surface entre l'outil et l'orifice central. L'opérateur ne pourrait donc pas anticiper la présence de traces sur les trajectoires radiales pour réguler le déplacement de l'outil en téléopération.

Pour l'essai 5, nous avons placé la "caméra grand angle" sur l'axe 5 du robot, au plus proche de l'outil, avec pour objectif d'améliorer la perception de l'état de propreté de la cuve. Les résultats de l'essai

montrent que la "vue outil" est perturbée par les rotations de l'axe 6, en bout duquel est placé l'outil, lors des déplacements du robot. En effet, la caméra étant placée en amont de l'axe 6, l'orientation de la vue varie en fonction des postures du robot. De plus, pendant l'essai l'axe 4 du robot a touché la caméra, ce qui a désorienté la vue par rapport à l'outil. L'espace disponible pour placer la caméra entre le bout de l'axe 4 du robot et l'effecteur est réduit. Il est ainsi difficile de trouver une position proche de l'outil en assurant l'absence de collision entre la caméra et le corps du robot sur l'ensemble des trajectoires. Enfin, le champ de vision n'est pas suffisamment large pour visualiser les surfaces autour de l'outil. Cette vue n'est donc pas exploitable pour suivre les opérations.

Lors du dernier essai, nous avons placé la "caméra très grand angle" en dessous de l'axe 3 du robot. On observe avec cette caméra une bonne vision autour de l'outil aussi bien pour le nettoyage de la virole que du fond de cuve. La largeur de champ facilite la visualisation de la position du robot et de l'outil dans la cuve, et permet de se représenter l'état de propreté d'une grande portion de la cuve. La qualité de l'image vidéo permet de visualiser les traces présentes sur la surface de la cuve et autour de l'outil, sans dégradation visible par rapport aux caméras ayant un angle plus faible fournissant une vue "zoomée". Cette largeur de champ semble offrir une vue confortable aussi bien pour l'inspection de l'état de propreté de la cuve en supervision que pour la téléopération des opérations de nettoyage.

Conclusion des essais de positionnement des caméras

Pour optimiser le placement des caméras pour la supervision et pour la téléopération du nettoyage des cuves, les vues "cuve" et "outil" doivent être considérées conjointement, les apports de l'une pouvant compenser les défauts de l'autre. Le positionnement de la "vue outil" en dessus de l'axe 3 du robot ²⁴, évalué lors de l'essai 1, présente peu d'intérêt puisque la "vue cuve" fournit déjà une vue de dessus. L'utilisation de deux caméras sur la potence fixe pour la "vue cuve" est moins intéressante que le placement d'une caméra "très grand angle" sur l'axe 1 du robot car elle nécessite plus de matériel et oblige l'opérateur à observer un écran de plus pour la même quantité d'information. De plus, l'orientation dans le plan horizontal de "vue outil" placée sur l'axe 3 change en même temps que l'axe 1 du robot tourne. Placer la "caméra cuve" sur l'axe 1 du robot permet d'avoir les deux vues coordonnées avec les mouvements du robot. Avec ces deux vues, l'outil reste toujours en face de l'opérateur qui peut se représenter le bras du robot comme étant le prolongement de son bras. L'utilisation d'une "vue cuve" fixe forcerait les opérateurs à combiner les informations issues de deux vues dont les repères sont très différents.

La "vue cuve" placée sur l'axe 1 du robot offre les informations suivantes aux opérateurs :

- position de l'outil dans le plan horizontal ;
- état global de propreté de la cuve ;
- pour le nettoyage de la virole selon des trajectoires circulaires, présence de traces sur la paroi avant et après le passage de l'outil ;
- pour le nettoyage du fond de cuve selon des trajectoires radiales, présence de traces sur la paroi après le passage de l'outil, entre l'outil et la virole.

Le placement de la "vue outil" en dessous de l'axe 3 permet d'afficher aux opérateurs des informations qui ne sont pas capturées par la "vue cuve" :

- position verticale de l'outil ;
- état de propreté de la cuve au plus proche de l'outil ;
- pour le nettoyage de la virole, estimation plus précise de la présence de traces sur la paroi sur la trajectoire de l'outil ;
- pour le nettoyage du fond de cuve, présence de traces sur la paroi sur la trajectoire de l'outil, entre l'outil et l'orifice central.

Avec ce positionnement des vues "cuve" et "outil", leur combinaison permet d'estimer les positions dans l'espace du robot et de l'outil. Elles offrent par ailleurs des vues complémentaires des surfaces à

24. Pour rappel, les axes du robot sont indiqués et numérotés sur la figure 4.27 page 111.

nettoyer et en cours de nettoyage.

Pour la "vue cuve" sur l'axe 1 du robot, nous avons comparé l'utilisation des caméras "classique" et "très grand angle", en les déportant ou non par rapport à l'axe. Les essais ont mis en valeur qu'il est plus facile de repérer les positions du robot et de l'outil dans la cuve avec celle ayant le plus grand champ de vision. La "caméra très grand angle" déportée par rapport à l'axe 1 permet de visualiser la cuve entièrement à chaque instant. Ce positionnement de la caméra permettrait aux opérateurs de se représenter l'ensemble des traces résiduelles sur les surfaces de la cuve. L'utilisation d'un marqueur visuel fixé sur le haut de la virole de la vue suffirait pour que les opérateurs connaissent la position de l'outil dans la cuve par rapport à un repère fixe. Le placement de la caméra au plus proche de l'axe 1 offre une meilleure estimation de la position en hauteur de l'outil, cependant cette information est fournie par la "vue outil". Nous retiendrons donc pour le futur système l'utilisation d'une "caméra très grand angle" déportée par rapport à l'axe 1 du robot, comme configuration optimale pour la "vue cuve". Cette configuration correspond à celle de l'essai 3.

Pour la "vue outil" en dessous de l'axe 3 du robot, nous avons comparé deux positionnements de la "caméra grand angle" avec l'utilisation de la "caméra très grand angle". Lorsque la "caméra grand angle" est orientée vers le fond de cuve, elle offre une bonne visualisation pour le nettoyage du fond de cuve, mais n'offre qu'une vue partielle de l'outil lors du nettoyage de la virole. La "caméra grand angle" offre un champ de vision insuffisant pour avoir une visualisation correcte à la fois sur le fond de cuve et sur la virole, sans adapter son orientation à la surface à nettoyer. Lors de l'essai 6 avec la "caméra très grand angle", le champ de vision plus large a permis d'avoir une bonne visualisation des opérations de nettoyage à la fois sur le fond de cuve et sur la virole. Nous retiendrons donc pour le futur système l'utilisation d'une "caméra très grand angle" ou d'une "caméra grand angle" orientable en dessous de l'axe 3 du robot.

Pour les tests utilisateurs avec les opérateurs du nettoyage des cuves sur le prototype, la caméra GoPro "très grand angle" ne peut pas être utilisée car elle ne permet pas de donner un retour visuel en direct sur les écrans. Pour la "vue outil", nous utiliserons la webcam "grand angle" sous l'axe 3 pendant les essais de supervision et de téléopération avec les opérateurs. Pour palier au champ de vision réduit, nous réaliserons les essais de nettoyage de la vue en deux temps. Pour les essais sur la virole, nous orienterons la caméra vers la virole. Pour les essais sur le fond de cuve, nous orienterons la caméra vers le fond de cuve. Pour la "vue cuve", nous utiliserons la webcam "classique" selon la configuration de l'essai 1. Le champ de vision réduit de cette caméra permet de visualiser environ un tiers de la cuve. Par conséquent, et étant donnée la quantité limitée de produit inerte disponible, nous restreindrons les essais avec les opérateurs sur un quart de cuve. Pour permettre aux opérateurs de se repérer dans la cuve, nous avons délimité les zones de la virole et du fond de cuve à nettoyer avec des bandes adhésive blanche. Les vues retenues pour les tests utilisateurs de supervision et de téléopération avec les opérateurs du nettoyage des cuves sont illustrées sur la figure 4.37.



Figure 4.37 – Vues caméras retenues pour les essais de supervision et de téléopération avec les opérateurs : "vue cuve" sur l'axe 1 du robot à gauche et "vue outil" sous l'axe 3 du robot à droite.

4.3.3.2 Développement de la commande du robot en téléopération

Après avoir choisi la configuration de placement des caméras pour contrôler les opérations de nettoyage des cuves en supervision et en téléopération, nous avons développé la commande du robot en téléopération. Deux dispositifs de commande ont été retenus pour ce prototype : un joystick et un bras haptique. Une commande spécifique a été implémentée pour chacun de ces dispositifs. Nous avons développé ces commandes pour qu'elles soient adaptées au nettoyage de la cuve dans le repère visuel fourni par les caméras précédemment positionnées.

Développements de la commande avec le dispositif haptique

Le contrôle en téléopération d'un robot "esclave" à l'aide d'un bras "maître" haptique a fait l'objet de nombreux développements par le CEA. Le bras "maître" haptique Haption Virtuose 6D et le robot "esclave" Stäubli TX90XL sont couplés de manière bilatérale [JA95] pour permettre à l'opérateur de contrôler les forces appliquées. L'architecture de commande bilatérale cartésienne implémentée par le CEA est décrite par Geffard et ses collaborateurs [GRMA10] et synthétisée dans la figure 4.38.

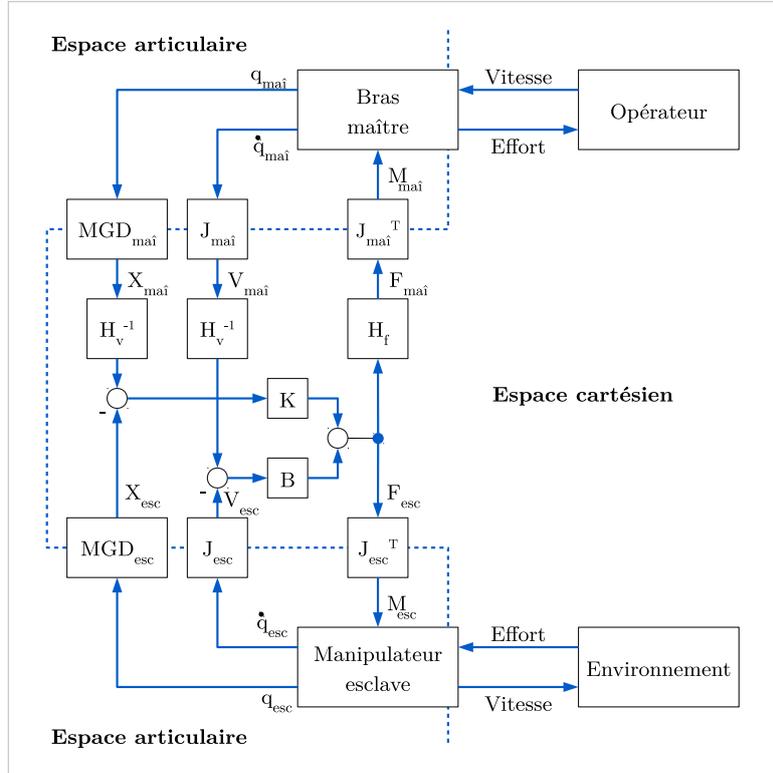


Figure 4.38 – Schéma bloc de la commande bilatérale cartésienne fournie par le CEA pour la téléopération du prototype, repris de Geffard et al. [GRMA10].

La loi de commande peut s'écrire ainsi :

$$F_{esc} = H_f^{-1} F_{mai} = K(H_v^{-1} X_{mai} - X_{esc}) + B(H_v^{-1} V_{mai} - V_{esc})$$

où :

- F_{mai} et F_{esc} sont respectivement les torseurs efforts cartésien des bras "maître" et "esclave".
- H_v et H_f sont respectivement les coefficients d'homothétie en vitesse et en effort. Ils permettent d'amplifier ou de diviser les déplacements et efforts appliqués par l'opérateur sur le bras "maître" avant de les retranscrire au bras "esclave" : $V_{mai} = H_v V_{esc}$ et $F_{mai} = H_f F_{esc}$.
- K et B sont les gains cartésien de couplage entre les bras "maître" et "esclave", respectivement les gains ressort et amortisseur. Ils définissent la raideur et l'amortissement de la liaison virtuelle entre le robot manipulateur et le dispositif haptique.

- $X_m = MGD_m(q_m)$ (avec $m = ma\hat{i}$ ou esc) donne la position cartésienne X_m des mécanismes "maître" et "esclave" à partir de leur position articulaire q_m et de leur modèle géométrique direct (MGD).
- $V_m = J_m \dot{q}_m$ donne la vitesse cartésienne V_m du mécanisme m à partir de ses vitesses articulaires \dot{q}_m et de sa matrice jacobienne J_m .
- $\tau_m = J_m^T F_m$ donne les efforts articulaires τ_m à partir du torseur d'efforts cartésien F_m et de la matrice jacobienne transposée J_m^T du mécanisme m .

Le dispositif haptique "maître" permet de contrôler jusqu'à 6 degrés de liberté. Plus l'opérateur dispose de DDL, plus il pourra réguler de variabilités, mais plus la complexité d'exécution de la tâche augmente. Il est donc nécessaire de fournir aux opérateurs un nombre de DDL approprié pour simplifier la réalisation du nettoyage des cuve en téléopération, tout en leur laissant suffisamment de marge de manœuvre pour faire face aux variabilités des situations. Le CEA a développé le concept de mécanismes virtuels (MV) pour contraindre les mouvements de l'opérateur et du robot, et ainsi réduire le nombre de DDL [JAH97]. Ces contraintes sont implémentées en couplant virtuellement l'effecteur du robot à l'effecteur d'un mécanisme virtuel à travers un ressort amortisseur. Ce couplage est décrit par l'équation suivante :

$$F_{mv} = K_{mv}(X_{mv} - X_{esc}) + B_{mv}(V_{mv} - V_{esc})$$

où X_{mv} et X_{esc} sont respectivement les positions cartésiennes du MV et du robot, et V_{mv} et V_{esc} les vitesses cartésiennes du MV et du robot. K_{mv} et B_{mv} sont les gains cartésiens de couplage entre le robot et le MV, respectivement les gains ressort et amortisseur. F_{mv} est l'effort appliqué par le ressort amortisseur sur le robot. Le modèle géométrique direct MGD_{mv} du mécanisme virtuel et sa jacobienne J_{mv} définissent les mouvements libres, qui sont contrôlés en force, et les contraintes, qui sont contrôlées en position.

Pour adapter le système de téléopération aux spécificités du nettoyage des cuves, nous avons définis des mécanismes virtuels et étudié le réglage des coefficients d'homothétie en vitesse H_v et en effort H_f . L'utilisation de MV et de paramètres appropriés vise à optimiser l'efficacité de la conduite des opérations en téléopération et à réduire l'effort physique des opérateurs. Les gains K , K_{mv} , B et B_{mv} pré-réglés par le CEA qui définissent la raideur et l'amortissement des liaisons virtuelles entre le bras haptique, le robot et le MV n'ont pas été modifiés pour notre application.

Nous avons définis dans la section 4.2.1.1, 6 paramètres $(r, \theta, h, \alpha, \beta, \gamma)$ permettant de caractériser les degrés de liberté nécessaires aux opérateurs et les déplacements pouvant être contraints pour le nettoyage des cuves. En téléopération à retour d'effort, un degré de liberté permet non seulement à l'opérateur de contrôler les déplacements de l'outil dans la direction donnée, mais également de contrôler les efforts appliqués dans cette direction.

Pour le nettoyage du fond de cuve, nous avons choisi d'appliquer la contrainte $\beta = 0$ pour que l'arête en bout de raclette soit parallèle au fond de cuve. Nous avons pris pour hypothèse qu'il existait une inclinaison de la raclette optimale γ_o pour ajouter la contrainte $\gamma = \gamma_o$. Les essais du procédé de raclage automatisé réalisés avec le prototype ont montré que l'inclinaison de la raclette avait peu d'influence sur la qualité du nettoyage. Nous avons fixé pour la suite $\gamma = \frac{\pi}{4}$ lors du raclage. Pour l'opération de grattage, nous appliquons les contraintes $\beta = 0$ et $\gamma = 0$ pour que l'outil de grattage soit parallèle au plan du fond de cuve.

Les paramètres r et θ doivent rester libre pour que l'opérateur puisse contrôler les déplacements des outils dans le plan du fond de cuve. Le paramètre h est laissé libre pour que l'opérateur puisse contrôler avec le dispositif haptique l'approche de l'outil sur le fond de cuve, ainsi que la force normale d'appui sur la surface. Enfin, le paramètre α caractérise la rotation de l'outil autour de l'axe vertical. Poser $\alpha = \frac{\pi}{2}$ permet de contraindre l'orientation de l'outil vers le centre de la cuve. Cette contrainte favorise le nettoyage du fond de cuve à l'aide de trajectoires radiales pour pousser le produit vers l'orifice central. Laisser ce paramètre libre offre plus de marge de manœuvre aux opérateurs pour réaliser des trajectoires différentes en fond de cuve.

Nous avons ainsi développé deux mécanismes virtuels pour évaluer avec les opérateurs le plus adapté au nettoyage du fond de cuve :

- Le premier correspond à la contrainte des deux paramètres β et γ , laissant 4 DDL aux opérateurs.
- Le second ajoute la contrainte du paramètre α , laissant 3 DDL aux opérateurs.

Le mécanisme virtuel donnant 4 DDL est composé de trois articulations prismatiques q_0, q_1, q_2 , pour les trois translations de l'espace, et d'une articulation rotoïde q_3 autour de l'axe z . Ce mécanisme est illustré sur la gauche de la figure 4.39. Le mécanisme virtuel donnant 3 DDL est composé de deux articulations prismatiques q_0, q_2 et d'une articulation rotoïde q_1 autour de l'axe z . L'articulation prismatique q_2 est attachée après l'articulation rotoïde q_1 , qui est centrée sur l'axe de révolution de la cuve, pour contraindre l'orientation de l'outil vers l'orifice de fond de cuve. Ce mécanisme est illustré sur la droite de la figure 4.39.

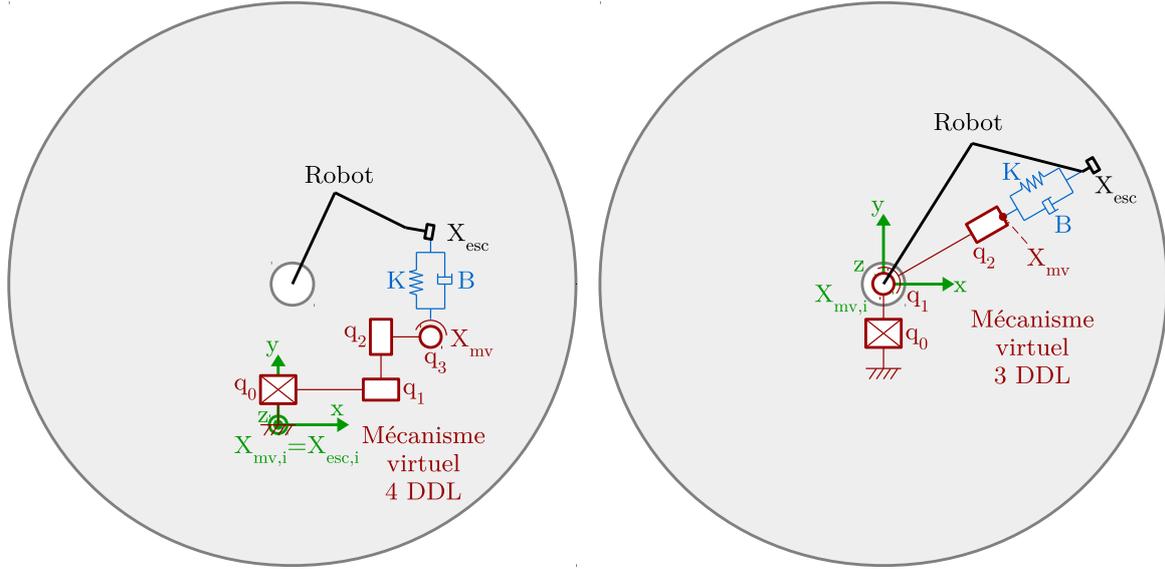


Figure 4.39 – Mécanismes virtuels développés pour le nettoyage en téléopération du fond de cuve : 4 DDL (à gauche) et 3 DDL (à droite). Le mécanisme virtuel est schématisé en rouge, le robot en noir et leur couplage ressort amortisseur en bleu. $X_{esc,i}$ et $X_{mv,i}$ correspondent respectivement la position de l'effecteur du robot et de l'effecteur du mécanisme virtuel à la création du MV.

Ainsi les MGD des mécanismes virtuels pour le fond de cuve sont :

$$MGD_{mv}^{4DDL} = \begin{cases} Tx = q_1 \\ Ty = q_2 \\ Tz = q_0 \\ Rx = 0 \\ Ry = 0 \\ Rz = q_3 \end{cases} \quad MGD_{mv}^{3DDL} = \begin{cases} Tx = q_2 \cos(q_1) \\ Ty = q_2 \sin(q_1) \\ Tz = q_0 \\ Rx = 0 \\ Ry = 0 \\ Rz = q_1 \end{cases}$$

où Tx, Ty, Tz et Rx, Ry, Rz correspondent respectivement aux translations et aux rotations autour des axes x, y et z .

Les matrices jacobiennes correspondantes dérivent simplement des MGD et sont les suivantes :

$$J_{mv}^{4DDL}(q_0, q_1, q_2, q_3) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad J_{mv}^{3DDL}(q_0, q_1, q_2) = \begin{bmatrix} 0 & -q_2 \sin(q_1) & \cos(q_1) \\ 0 & q_2 \cos(q_1) & \sin(q_1) \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Pour la virole, seule l'opération de grattage est réalisée en téléopération, le raclage n'étant pas nécessaire sur cette paroi où peu de résidus de produit sont présents. Comme pour le fond de cuve, nous avons posé fixe les paramètres β et γ pour que l'outil de grattage soit parallèle à la surface en contact sur la virole. Nous avons également choisi de contraindre la rotation de l'outil autour de l'axe normal à la surface car l'éponge abrasive servant au grattage est placée sur une mousse en bout d'outil pour s'adapter à la courbure de la virole. Une même orientation de l'outil autour de l'axe normal permet donc à la fois de gratter selon des trajectoires verticales ou circulaires. Ainsi, seul un mécanisme virtuel à 3 DDL a été implémenté pour le grattage de la virole en téléopération. Il offre des degrés de liberté à l'opérateur selon les trois paramètres (r, θ, h) . Ce mécanisme est en fait le même que le MV à 3 DDL implémenté pour le fond de cuve. La différence réside dans le placement initiale de l'outil face à la virole plutôt que face au fond de cuve. Lorsque ce MV est activé, le dispositif haptique permet à l'opérateur de contrôler les déplacements et les efforts de l'outil parallèlement à la virole, aussi bien verticalement que selon des mouvements circulaires. L'opérateur peut également contrôler l'approche de l'outil et la force exercée dans la direction normale à la surface de contact.

Les mécanismes virtuels définis précédemment visent à faciliter la réalisation du nettoyage des cuves en téléopération pour les opérateurs, en contraignant certains mouvements. Le réglage des coefficients d'homothétie en vitesse H_v et en effort H_f a également une influence sur la réalisation des opérations. Nous avons réglé l'homothétie en vitesse pour qu'un déplacement d'une longueur de bras de l'opérateur permette de parcourir un rayon de la cuve. Les déplacements du robot manipulateur ont ainsi été amplifié par 2 par rapport à ceux du dispositif haptique. Cette valeur a été définie expérimentalement et est un compromis entre des valeurs inférieures qui donnent plus de précision aux déplacements et des valeurs supérieures qui augmentent la rapidité des déplacements. La valeur retenue permet d'avoir des déplacements rapides tout en gardant leur maîtrise.

Le nettoyage d'une cuve nécessitant d'appliquer des efforts élevés sur le propergol, nous avons réglé le coefficient d'homothétie en effort pour que le robot décuple les efforts appliqués par l'opérateur sur le bras haptique. Nous avons déterminé expérimentalement un facteur d'environ 14, permettant de soulager l'opérateur des efforts à fournir pour nettoyage le produit, tout en gardant une maîtrise des efforts appliqués. Pendant les essais de raclage automatisé, nous avons mesuré des efforts de poussée radiale pouvant atteindre 450 N . Avec l'amplification des efforts paramétrée, l'opérateur devra donc exercer au maximum des efforts de l'ordre de 30 N .

La réalisation du nettoyage des cuves en téléopération avec le dispositif haptique est illustré sur la figure 4.40.



Figure 4.40 – Illustration du pilotage du robot avec le dispositif haptique.

La commande développée a été adaptée au repère visuel fourni par les caméras positionnées sur le robot. En fond de cuve, lorsque l'opérateur ramène le bras "maître" vers lui, le robot ramène le produit vers l'orifice central. Lorsque l'opérateur effectue des mouvements verticaux, l'outil est déplacé verticalement. Les mouvements latéraux de l'opérateur permettent de réaliser des trajectoires circulaires aussi bien en fond de cuve que sur la virole.

Développement de la commande avec le joystick

Pour le pilotage du robot en téléopération à l'aide du joystick nous sommes reparti de la commande réalisée pour contrôler le robot virtuel sous V-REP, qui est décrite dans la section 4.2.2.3. Les déplacements des axes x_{joy} et y_{joy} du joystick sont utilisés pour générer une consigne en vitesse cartésienne de déplacement de l'outil parallèlement à la surface. Le contrôle de la force normale d'appui sur les parois de la cuve est implémenté à l'aide de mécanismes virtuels [JAH97]. Suite aux résultats des essais de nettoyage automatisé, la force normale de consigne est réglée à 200 N pour le raclage et à 100 N pour le grattage. La gâchette du joystick est utilisée pour mettre l'outil en contact avec la surface et activer le mécanisme virtuel, puis pour désactiver le MV et éloigner l'outil de la surface. Trois autres boutons sur le joystick sont utilisés pour la mise en position initiale de l'outil sur la virole, sur le fond de cuve et pour le retour du robot en position de garage.

Lors du nettoyage du fond de cuve, les contraintes ($\alpha = \frac{\pi}{2}, \beta = 0, \gamma = \frac{\pi}{4}$) sont appliquées. La commande de l'effecteur du robot avec les axes du joystick peut s'écrire de la façon suivante, en reprenant les conventions de la section 4.2.2.3 :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v_1 p_{x_{joy}} \\ \frac{dy}{dt} = v_2 p_{y_{joy}} \end{cases}$$

où v_1 et v_2 sont des nombres réels strictement positifs, correspondant aux vitesses maximales de déplacement de l'outil dans chaque direction. Conformément aux résultats des essais de nettoyage automatisé réalisés précédemment, nous avons retenu $v_1 = 0.20 \text{ m.s}^{-1}$. Nous avons choisi une vitesse angulaire $v_2 = 4 \text{ deg.s}^{-1}$ qui correspond à une vitesse d'environ 0.20 m.s^{-1} proche de la virole.

Pour le grattage de la virole, les contraintes d'orientation ($\alpha = 0, \beta = -\frac{\pi}{2}, \gamma = 0$) sont appliquées. La commande de l'effecteur du robot avec les axes du joystick peut s'écrire de la façon suivante :

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = v_3 p_{y_{joy}} \\ \frac{dh}{dt} = v_4 p_{x_{joy}} \end{cases}$$

où v_3 et v_4 sont des nombres réels strictement positifs, correspondant aux vitesses maximales de déplacement de l'outil dans chaque direction. Conformément aux résultats des essais de nettoyage automatisé réalisés précédemment, nous avons retenu $v_3 = v_4 = 0.20 \text{ m.s}^{-1}$.

La réalisation du nettoyage des cuves en téléopération avec le joystick est illustré sur la figure 4.41.

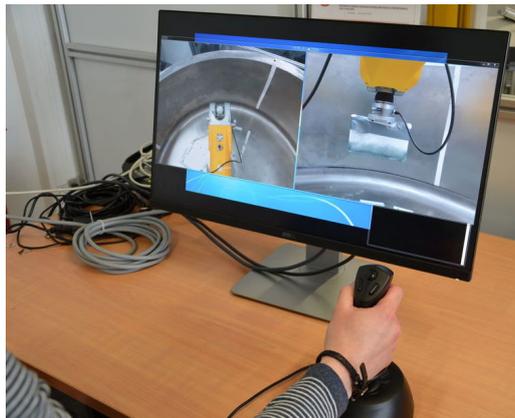


Figure 4.41 – Illustration du pilotage du robot avec le joystick.

De même qu'en téléopération avec le dispositif haptique, la commande du joystick a été adaptée au repère visuel fourni par les caméras positionnées sur le robot. Sur le fond de cuve, lorsque l'opérateur tire le joystick vers lui, le robot ramène le produit vers l'orifice central. Un déplacement latéral du joystick exécute des trajectoires circulaires aussi bien en fond de cuve que sur la virole. Sur la virole, l'outil monte lorsque l'opérateur pousse le joystick vers l'avant et descend lorsqu'il tire le joystick.

Ces commandes ont été implémentées dans le superviseur SCORE du CEA qui envoie la consigne au contrôleur de TAO prenant en charge l'asservissement du robot.

4.3.3.3 Préparation du contrôle supervisé

Suite au placement des caméras et au développement de la commande du robot en téléopération avec le joystick et le dispositif haptique, nous avons développé le contrôle supervisé des opérations de nettoyage. Le contrôle supervisé est un mode complémentaire à la téléopération permettant aux opérateurs de conduire les opérations à distance à travers une interface de supervision. Dans ce mode de contrôle, l'opérateur peut lancer des cycles automatisés et suivre les opérations à distance, sans utiliser le joystick ou le dispositif haptique. Suite aux essais de nettoyage automatisé, nous avons retenu un raclage préliminaire du propergol présent dans la cuve à l'aide d'un cycle automatisé du robot supervisé par l'opérateur. Le contrôle supervisé permettra également à l'opérateur de naviguer dans les différentes étapes du nettoyage de la cuve et de passer, par exemple, en téléopération.

L'interface de supervision regroupe les différents retours d'informations nécessaires à la conduite des opérations à distance, dont les retours visuels définis précédemment, et les moyens d'action sur le robot, le procédé de nettoyage et plus généralement sur les opérations à réaliser. Une maquette d'interface graphique de supervision a été mise au point par Théo Moulières-Seban pour évaluer les commandes et les retours d'informations complémentaires dont auront besoin les opérateurs tout au long du futur cycle de nettoyage. Cette maquette n'était pas connectée au prototype et avait pour objectif de proposer aux opérateurs une navigation entre les opérations de nettoyage, des moyens de modifier les paramètres procédés et l'affichage de retours d'informations sur l'état du système et sur les efforts mesurés. Cette maquette non fonctionnelle a été évaluée en parallèle des autres éléments du prototype et est présentée plus en détail dans la thèse de Moulières-Seban [MS17]. Elle a notamment été utilisée comme un support visuel aux scénarios déployés lors des tests utilisateurs. Les discussions avec les opérateurs ont permis d'améliorer cette maquette d'interface de supervision, dont un des affichage est présenté sur la figure 4.42).

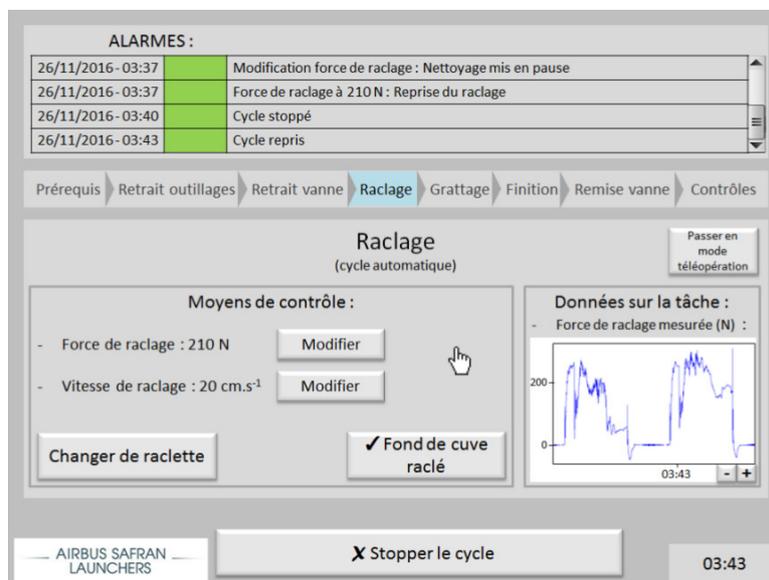


Figure 4.42 – Capture d'écran de la maquette d'interface graphique après discussion avec les opérateurs.

Pour enchaîner les différentes opérations en contrôle supervisé et en téléopération sur le prototype, nous avons développé plusieurs scripts PyTAO :

- Cycles automatiques de nettoyage pour le contrôle supervisé : raclage du fond de cuve, grattage du fond de cuve et grattage de la virole.

- Lancement et arrêt des différents mécanismes virtuels pour la téléopération.
- Changement de repère pour que les opérations effectuées en téléopération soient commandées dans un repère adapté à la tâche.
- Mise en position articulaire initiale pour chaque opération effectuée en téléopération.
- Mise en position de changement d'outil.
- Mise en position de garage du robot.

Ces scripts correspondent aux différentes commandes devant être exécutées par les opérateurs tout au long du cycle de nettoyage avec le prototype. Ils ont été utilisés pour les tests utilisateurs avec les opérateurs.

4.3.3.4 Synthèse de l'architecture matérielle et logicielle développée

L'architecture matérielle et logicielle mise en œuvre pour le prototype est synthétisée dans la figure 4.43. Les éléments ajoutés et développés pour notre application sont indiqués en bleu.

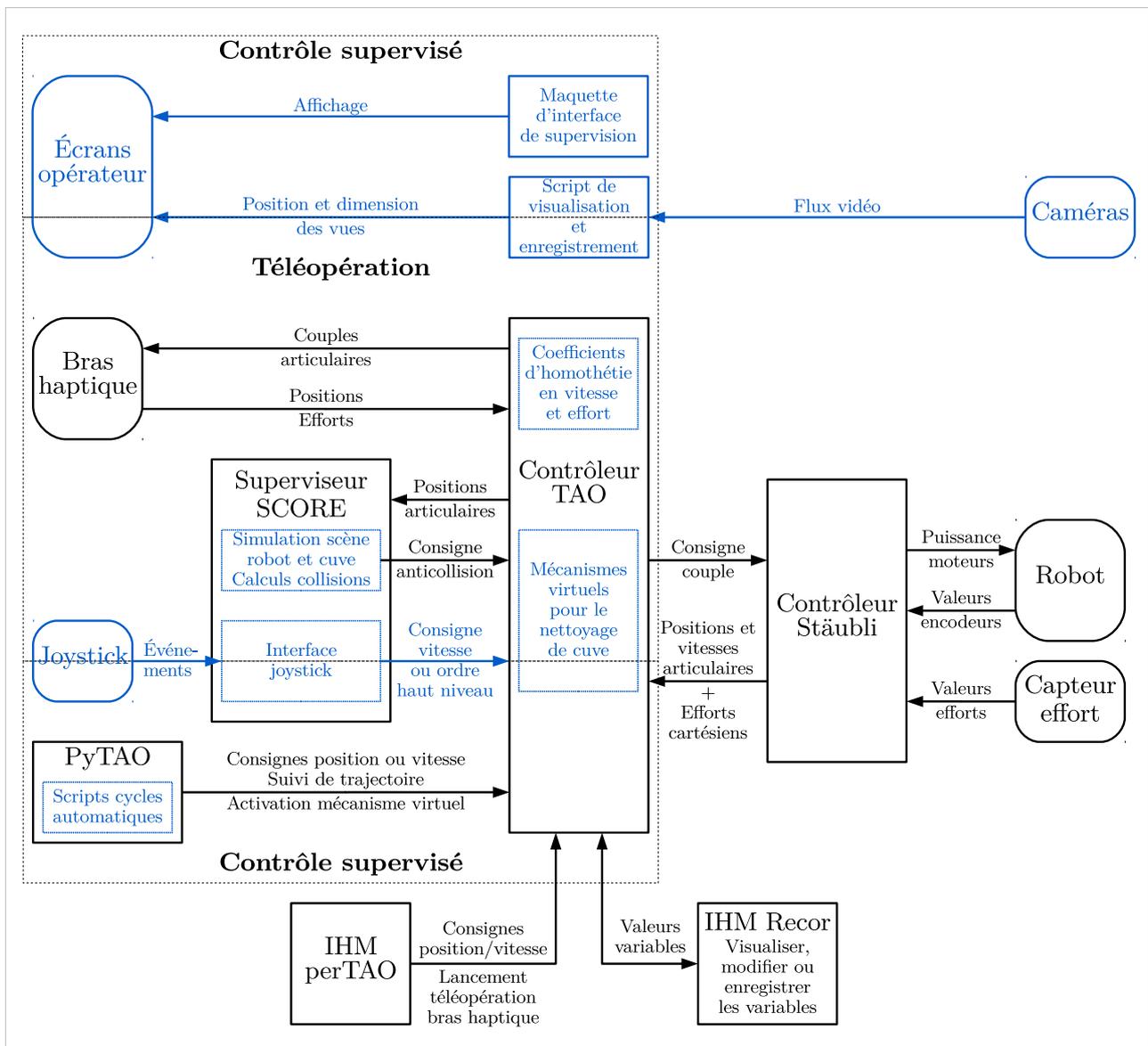


Figure 4.43 – Architecture logicielle finale du prototype de nettoyage des cuves. En noir, l'architecture initiale du CEA et, en bleu, les éléments ajoutés au cours du développement du prototype pour le nettoyage des cuves.

La plupart des éléments que nous avons développé dans ce prototype pour l'application au nettoyage des cuves ont été décrits dans les sections précédentes. Les éléments synthétisés en bleu dans la figure 4.43 sont :

- Le placement des caméras et l'affichage des retours visuels pour le contrôle supervisé et pour la téléopération du nettoyage des cuves.
- La mise au point d'une maquette d'interface graphique de supervision.
- Le développement des mécanismes virtuels 3 DDL et 4 DDL pour la téléopération avec le dispositif haptique.
- Le réglage des coefficients d'homothétie en vitesse et en effort pour la téléopération du nettoyage de la cuve avec le dispositif haptique.
- Le développement de la commande avec le joystick et l'intégration dans le superviseur SCORE pour transmettre les consignes au contrôleur TAO.
- La réalisation de scripts en utilisant la bibliothèque logicielle PyTAO pour exécuter des cycles automatiques et changer de mode de contrôle.
- La création d'une scène 3D contenant la cuve, le robot sur la potence et les outil pour la gestion de l'anticollision.

L'utilisation des éléments du prototype pour le contrôle supervisé et pour la téléopération est mise en valeur sur la figure 4.43. La maquette d'interface de supervision et les cycles automatiques développés sont utilisés pour le contrôle supervisé. Le bras haptique est utilisé exclusivement en téléopération. Le retours visuels issus des caméras servent à la fois à la téléopération et au contrôle supervisé. Enfin, le joystick recouvre à la fois la téléopération et le contrôle supervisé car ses boutons peuvent être utilisés pour exécuter des actions automatisées : mise dans des positions initiales et activation/désactivation du contrôle en force sur la surface.

4.3.4 Tests utilisateurs avec le prototype et résultats

Dans les sections précédentes nous avons présenté le prototype de système cobotique de nettoyage des cuves, les essais du procédé de nettoyage automatisé et les développements réalisés sur le prototype pour adapter la téléopération et le contrôle supervisé aux opérations de nettoyage. Pour évaluer les hypothèses de conception sur le système cobotique, listées en introduction de la section 4.3, nous avons mené des tests utilisateurs dont les résultats sont présentés ici.

Les objectifs des tests utilisateurs étaient d'évaluer :

- La répartition des rôles proposée entre l'opérateur et le robot au cours du cycle de nettoyage : cycles de nettoyage automatisés avec le robot supervisé par l'opérateur, puis téléopération du robot par l'opérateur.
- Les retours visuels en contrôle supervisé et en téléopération.
- Les dispositifs de commande et le nombre de degrés de liberté nécessaires pour la téléopération du nettoyage de la cuve.
- L'apport des mécanismes virtuels pour la téléopération avec le dispositif haptique.
- L'intérêt du retour de force.
- L'interface de supervision.

L'implication des opérateurs du nettoyage de cuve permet par ailleurs d'évaluer plus généralement la représentativité du dispositif et des situations testées, l'adaptation du système à leurs besoins, leur satisfaction face à la transformation du travail proposée, la marge de manœuvre du système cobotique face aux variabilités, l'acceptation du système par les futurs utilisateurs et la potentielle future activité de travail.

Les tests utilisateurs se sont déroulés de la manière suivante :

1. Application préalable de produit inerte en fond de cuve et sur la virole.
2. Explication de l'objectif du test, du fonctionnement du prototype et des conditions expérimentales.

3. Début du test avec un scénario de contrôle supervisé consistant à surveiller des cycles de raclage et de grattage automatiques sur le fond de cuve et sur la virole à travers les caméras.
4. Raclage et grattage du fond de cuve et de la virole en téléopération à l'aide des différents dispositifs de commande :
 - joystick ;
 - dispositif haptique 6 DDL, sans MV ;
 - dispositif haptique avec MV 4 DDL ;
 - et dispositif haptique avec MV 3 DDL.

Pour contrebalancer l'effet d'apprentissage, les quatre types de contrôle étaient utilisés dans un ordre différent d'un utilisateur à l'autre.
5. Discussion libre pour collecter les retours de l'utilisateur.

En plus chaque utilisateur devait remplir des questionnaires au début et à la fin du test, pour évaluer sa satisfaction de l'activité proposée, la facilité d'utilisation perçue des différents dispositifs de commande, l'utilité de chaque retour visuel, l'acceptabilité du système et le dispositif de commande préféré. Jusqu'à 10 minutes étaient laissées à l'utilisateur pour se familiariser avec chaque dispositif de commande. Les opérations de nettoyage en téléopération étaient ensuite chronométrées et l'efficacité du nettoyage évaluée visuellement sur des conditions initiales identiques²⁵ pour chaque dispositif de commande.

En raison de contraintes de production d'ArianeGroup, nous n'avons pu réaliser le test qu'avec quatre opérateurs du nettoyage des cuves, un opérateur de maintenance, et une personne du service industrialisation, expert des installations pyrotechniques. Ce nombre ne permet pas de donner de résultat quantitatif. Les résultats qualitatifs suivants peuvent cependant être mis en valeur :

Répartition des rôles	<ul style="list-style-type: none"> — Les utilisateurs ont trouvé adapté le retrait de la majorité du produit avec un raclage automatisée en contrôle supervisé par l'opérateur. — Les opérateurs ont été globalement satisfait de la possibilité de prendre la main sur le nettoyage à distance grâce à la téléopération. — Un opérateur nous a alerté qu'il se sentait moins agile avec ce système qu'en manipulant directement ses outils et qu'il craignait d'être moins efficace qu'actuellement.
Retours visuels	<ul style="list-style-type: none"> — Les opérateurs auraient souhaité avoir des champs visuels plus larges pour les deux vues "cuve" et "outil". — Les utilisateurs ont utilisé en continu la vue de la "caméra outil" pour contrôler la trajectoire de l'outil et la qualité du nettoyage. — La "vue cuve" n'était utilisée que ponctuellement. — Les petits résidus sont difficiles à voir.

25. Quantité de produit, répartition sur les parois et durée de contact.

<p>Dispositifs de commande</p>	<p>Haptique</p> <ul style="list-style-type: none"> — Les opérations de nettoyage des parois de la cuve sont difficiles à réaliser en contrôlant les 6 DDL car en plus du positionnement de l'outil dans l'espace, les opérateurs doivent maîtriser l'orientation de l'outil pour maintenir un contact correct avec la surface, tout en gérant la force d'appui. — L'utilisation des mécanismes virtuels simplifie les opérations car la gestion de l'orientation de l'outil est transparente pour les utilisateurs. — Les opérateurs ont trouvé le mécanisme virtuel à 3 DDL trop contraignant. En fond de cuve ils ont préféré celui à 4 DDL qui leur a semblé plus confortable et donne suffisamment de marge de manœuvre pour adapter leurs gestes au cours des opérations. Pour le grattage de la virole, les opérateurs auraient également préféré avoir un quatrième degré de liberté en rotation autour de l'axe normal à la surface en contact. — Le contrôle de la position de l'outil avec le bras haptique a semblé globalement naturel aux utilisateurs. Cependant, les utilisateurs n'ont pas toujours l'impression d'avoir la maîtrise à cause des butées des axes du bras "maître". L'espace de travail du bras maître étant limité, les mouvements de l'utilisateur occasionnent parfois l'arrivée en butée de certains axes du bras. Étant concentré sur les opérations, les opérateurs ont alors des difficultés à discerner si ce blocage vient du retour d'effort ou d'une butée. — Le nettoyage de la virole semble plus difficile que le fond de cuve, les utilisateurs appuient plus fort et adoptent des postures inconfortables, en particulier au niveau du poignet. — Le réglage du coefficient d'homothétie en vitesse pour multiplier par 2 les déplacements du bras "esclave" par rapport au bras "maître" a semblé adapté aux opérateurs. — Malgré le réglage du coefficient d'homothétie en effort pour réduire 14 fois les efforts exercés par l'opérateur par rapport au robot, ces efforts ne sont pas négligeables. L'utilisation du dispositif haptique peut donc engendrer de la fatigue. Par ailleurs les opérateurs ont eu du mal à appréhender la force appliquée par le robot lorsqu'ils exercent un effort. Il est donc difficile de maîtriser les efforts de nettoyage. <p>Joystick</p> <ul style="list-style-type: none"> — Avec le joystick le contrôle de la force est transparent pour l'utilisateur et les opérations sont plus faciles. La force normale de consigne ayant été adaptée au raclage et au grattage, suite aux résultats des essais de nettoyage automatisé, les utilisateurs peuvent contrôler les déplacements de l'outil sur la paroi sans devoir gérer en continu l'effort à appliquer. — Le retour d'effort n'a pas manqué aux opérateurs sur les opérations réalisées. — Les opérations sont plus confortables avec le joystick qu'avec le dispositif haptique car l'effort physique est moindre pour déplacer les axes du joystick. — La transformation du travail est plus importante car les utilisateurs commandent le déplacement de l'outil en vitesse, contrairement au dispositif haptique qui permet de le commander en position. Ainsi les mouvements semblent moins naturels et plus lents avec le joystick. — Les opérateurs auraient souhaité avoir un troisième axe sur le joystick pour contrôler la rotation de l'outil autour de l'axe normal à la surface. Ce degré de liberté supplémentaire semble essentiel aux opérateurs pour avoir plus de marge de manœuvre et pour guider plus rapidement le produit vers l'orifice central dans certaines situations.
<p>Interface de supervision</p>	<ul style="list-style-type: none"> — Les opérateurs ont trouvé l'interface graphique de supervision globalement adaptée au suivi des opérations. — Les utilisateurs ont proposé certaines améliorations sur l'affichage des informations et sur les commandes disponibles²⁶.

26. Ces améliorations sont mises en valeur dans la thèse de Moulières-Seban [MS17].

Plus généralement	<ul style="list-style-type: none"> — Les utilisateurs auraient aimé qu'un voyant leur indique lorsque le robot est prêt à être téléopéré ou lorsque l'outil est en contact avec la cuve. — L'affichage d'une alerte lorsque les axes du bras maître ou du bras esclave sont en butée permettrait aux opérateurs de mieux comprendre les situations de blocage. — La possibilité d'entendre les opérations est importante pour une meilleure immersion. — Les utilisateurs ont trouvé l'anticollision indispensable en téléopération. — Les opérateurs nous ont indiqué que la pulvérisation de plastifiant sur les résidus de produit après le premier cycle de raclage faciliterait les opérations de grattage. — Les opérateurs nous ont confirmé que le produit inerte utilisé était représentatif des propergols les plus visqueux qu'ils ont l'habitude de rencontrer. — Les opérateurs font parfois face à des propergols dont la pégosité est plus élevée que le produit utilisé pour ces tests. Dans ces cas, l'utilisation de plastifiant est indispensable.
-------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tableau 4.8 – Résultats qualitatifs issus des tests utilisateurs avec le prototype de système cobotique de nettoyage des cuves.

Discussions

Les tests utilisateurs ont permis de confirmer l'intérêt d'un cycle préliminaire de raclage automatisé avec un contrôle supervisé de l'opérateur. La maquette d'interface de supervision a servi de support pour avoir de premiers retours sur les données présentées et les contrôles proposés aux opérateurs. Cependant le manque de communication entre cette maquette et le système robot du prototype a limité son évaluation qui aurait été plus représentative en fonctionnement. Des scripts ont été réalisés pour permettre aux opérateurs d'exécuter des actions en contrôle supervisé et un scénario leur a été fourni pour décrire l'enchaînement des opérations. L'interface de supervision fera l'objet de développements plus poussés dans la conception du système final.

Les opérateurs disposaient principalement des retours visuels pour suivre et conduire les opérations depuis le poste de commande distant. Ces tests ont permis d'évaluer avec les opérateurs le choix des vues "cuve" et "outil". Leur placement a semblé adapté et mais les opérateurs auraient souhaité avoir des champs visuels plus larges. Des caméras "très grand angle" fournissant un retour visuel direct sur les opérations seront nécessaires pour le futur système²⁷. La faible utilisation de la "vue cuve" par les opérateurs est probablement due à la zone de nettoyage réduite pendant les essais. Cela a pu diminuer l'apport de cette vue pour situer le robot dans la cuve et pour visualiser l'état de propreté global de la cuve. Des essais de validation devront être effectués avec des caméras "très grand angle" en nettoyant une cuve complète. La qualité des images et l'éclairage de la cuve devront également être optimisés pour améliorer la qualité de l'inspection à distance de l'état de propreté des parois. Un des critères d'optimisation sera la visibilité des petits résidus. La "vue atelier" sera étudiée après la définition du système final et de son implantation dans l'atelier.

En téléopération, les opérateurs ont ressenti le besoin d'au moins 3 degrés de liberté quel que soit le dispositif de commande : 2 DDL pour se déplacer sur la surface de la cuve et 1 DDL pour orienter l'outil autour de l'axe normal. Lors de l'utilisation du dispositif haptique, les utilisateurs ont ainsi préféré le mécanisme virtuel 4 DDL. Pour la téléopération avec joystick, les opérateurs nous ont indiqué qu'un joystick 3 axes était nécessaire. Les discussions avec les opérateurs n'ont pas révélé de préférence unanime de leur part pour le joystick ou pour le dispositif haptique. Les deux dispositifs de commande présentent des avantages et des inconvénients différents. Le dispositif haptique permet de réaliser des mouvements plus naturels et de manière efficiente, bien que le retour d'effort soit parfois une source de confusion pour les opérateurs du fait de l'architecture mécanique complexe du bras et des butées des axes. L'utilisation du dispositif haptique nécessite d'avoir une très bonne représentation spatiale des déplacements de l'outil dans la cuve, ce qui est plus difficile pour certaines personnes. Le joystick est plus facile à prendre en main, plus confortable à manipuler et les opérateurs ont semblé faire

27. Des vues "très grand angle", telles que définies dans la section 4.3.3.1, devraient être plus adaptées.

moins d'erreur de déplacement de l'outil. Le joystick offre cependant moins d'agilité et de rapidité aux utilisateurs dans les déplacements de l'outil. Les tests utilisateurs n'ont pas mis en évidence d'apport du retour d'effort. Les efforts importants devant être exercés pour le nettoyage du produit nous ont conduit à mettre un coefficient d'homothétie en effort élevé pour réduire les efforts côté opérateur. Cependant les opérateurs ont alors eu des difficultés à maîtriser les efforts appliqués par le robot.

Les essais de nettoyage automatisé avaient mis en valeur des limitations dues à la capacité de charge du robot utilisé – plus précisément aux efforts supportés par le poignet. Lors des tests utilisateurs, nous avons déposé une épaisseur d'environ 1 *cm* de produit inerte en fond de cuve, qui correspond aux situations nominales rencontrées par les opérateurs sur le poste de travail. Le robot était ainsi utilisé proche de ses capacités limites, aussi bien lors des cycles automatiques qu'en téléopération. Pour faire face aux situations extrêmes où une plus grande épaisseur de produit est présente en fond de cuve, un robot d'une gamme supérieure devra être utilisé dans les prochains développements. Cependant, un robot avec une plus grande capacité de charge signifie un poids et une inertie plus élevés qui affecteront la précision du contrôle en effort. Un compromis devra être trouvé dans le choix du modèle de robot pour générer des efforts suffisants et avoir une stabilité du contrôle en force qui garantissent la qualité du nettoyage pour des quantités de produit et des viscosités élevées. Le ratio entre la masse du robot et ses performances dynamiques sera un critère déterminant pour son choix.

Enfin, les outils développés pour le prototype ont des dimensions et des caractéristiques proches de ceux actuellement utilisés par les opérateurs. L'utilisation d'un robot ayant plus de puissance que les opérateurs permet d'envisager des optimisations sur les outils afin de nettoyer plus de produit en un passage. Ces optimisations sur les outils et sur les trajectoires lors des cycles automatiques n'ont pas été étudiées dans le cadre de ce prototype. Elles seront intégrées aux prochaines phases de développement.

Démonstrations et communications

Une fois les premiers développements sur le prototype terminés, nous avons réalisé de nombreuses démonstrations à des personnes d'ArianeGroup et de Safran. Au total nous avons présenté le prototype à plus de 70 personnes différentes qui ont pu le voir en fonctionnement et tester la téléopération du nettoyage. Les différents services et entités d'ArianeGroup étaient représentés pour faire des retours sur le système de nettoyage des cuves proposé et pour préparer les phases suivantes du projet : santé, sécurité et environnement (SSE), CHSCT, production, méthodes, procédés, programmes, industrialisation, maintenance. Nous avons ainsi pu discuter et anticiper les mesures de prévention et de protection nécessaires pour qu'un tel système fonctionne en milieu pyrotechnique. Cela a également été l'occasion de vulgariser nos travaux auprès des personnes de Safran et ArianeGroup, de communiquer sur l'intérêt de la démarche par simulations participatives et d'illustrer les possibilités offertes par la cobotique pour nos industries.

Enfin, ces démonstrations ont permis de convaincre les décideurs de l'intérêt de poursuivre les développements sur ce projet et de l'intérêt de notre travail pour étudier et améliorer d'autres postes de travail au sein de l'entreprise. Suite à cela, la cobotique a été positionné comme axe majeur de développement pour les projets sur l'usine du futur au sein d'ArianeGroup. De nouveaux projets, tel que l'amélioration du poste de finition des chargements de propergol décrit dans la section 5.1.1, ont ainsi vu le jour.

4.4 Industrialisation du système cobotique de nettoyage des cuves pour Ariane 5 et 6

Dans les sections précédentes, nous avons décrit la conception d'un système cobotique de nettoyage des cuves à travers plusieurs itérations de simulations participatives, la dernière s'appuyant sur un prototype. Ces différentes phases ont permis d'étudier et de développer conjointement les trois éléments

du système cobotique (l'activité de l'homme, le robot et la tâche) et leurs interactions (rôle de l'homme dans la réalisation de la tâche, rôle du robot dans la réalisation de la tâche et interactions homme-robot).

Le prototype réalisé a permis d'évaluer le fonctionnement du système cobotique en s'approchant des conditions réelles de travail et de valider ce principe de solution à l'échelle des cuves de Saint-Médard avec le groupe de travail et les décideurs. Suites aux démonstrations en présence des représentants des programmes Ariane 5 et 6, il a été décidé d'étudier plus en détail la transposition de la solution pour le nettoyage des cuves de Guyane. Celles-ci sont 5 fois plus volumineuses que celles de Saint-Médard.

Une analyse de l'activité des opérateurs de nettoyage des cuves a été réalisée en Guyane pour mettre en valeur les différences avec le poste de Saint-Médard et pour collecter les besoins réels des opérateurs guyanais. En nous appuyant sur cette analyse et sur les résultats du prototype, nous avons travaillé avec les service Industrialisation et Investissements pour définir une solution pouvant répondre aux besoins d'Ariane 5 et 6, et être implantée en Guyane, et pour déterminer son enveloppe de coût. Cette démarche marque un pas de plus vers le déploiement opérationnel de la solution industrielle.

Dans les sections suivantes nous allons présenter :

- les différences de besoin entre les postes de nettoyage des cuves de Saint-Médard et de Guyane ;
- l'étude d'un système adapté aux cuves de Guyane ;
- l'avancement du chiffrage de la solution et les perspectives du projet.

Pour simplifier le propos, nous parlerons de cuves "S" pour les cuves de Saint-Médard et de cuves "G" pour celles de Guyane. Nous parlerons de poste "S" pour le poste de nettoyage des cuves de Saint-Médard et de poste "G" pour celui de Guyane.

4.4.1 Description des besoins du nettoyage des cuves en Guyane

Le besoin d'améliorer le poste "G" avait été formulé au début du projet. Les services étude étant présent en France métropolitaine, et pour des raisons de logistique, nous sommes appuyés principalement sur l'analyse du poste "S" comme situation de référence. Pour alimenter la conception avec les caractéristiques et contraintes du poste guyanais, nous avons échangés durant le développement du système avec les exploitants de Guyane et avec des responsables d'étude des procédés et de l'industrialisation se rendant régulièrement en Guyane. Avant le développement du prototype, une mission d'une semaine a été effectuée en Guyane pour analyser l'activité des opérateurs et collecter de manière détaillée le travail réel et les besoins des opérateurs sur le poste "G". Nous avons ainsi pu comparer ces données avec celles issues de l'analyse du poste "S" pour formaliser les différences pour la conception du système cobotique.

La première différence notable porte sur la dimension des cuves "G" et "S". Les cuves "G" ont un diamètre environ deux fois supérieur, avec un orifice central deux fois plus grand et sont près de deux fois plus hautes. Pour nettoyer ces cuves, les opérateurs utilisent des outils similaires au poste métropolitain. Pour pouvoir racler le propergol depuis l'extérieur de la cuve, le manche des raclettes fait environ 3 m de long. Du fait des dimensions supérieures et du nettoyage depuis l'extérieur, les efforts exercés par les opérateurs sont plus importants en Guyane, ce qui accroît la fatigue physique.

Les conditions climatiques guyanaises rendent également le travail plus difficile à cause des températures et de l'humidité élevées toute l'année, et car les postes de nettoyage sont ouverts sur l'extérieur. Ces conditions climatiques imposent des contraintes sur la résistance des matériaux et des systèmes implantés à des hygrométries supérieures à 95%. Autrement ces derniers doivent être placés en local fermé et climatisé.

Du fait des cadences actuelles de production du propergol Ariane 5 et de la durée des opérations au poste de nettoyage, deux postes de nettoyages de cuve "G" sont utilisés pour pouvoir accueillir alternativement les cuves qui s'enchaînent. Ces postes sont accolés dans le bâtiment de nettoyage et séparés par un mur anti-déflagration pour que les opérations pyrotechniques puissent avoir lieu en

même temps sur les deux postes (cf. figure 4.44). Actuellement, la durée nominale de séjour d'une cuve "G" sur le poste de nettoyage est d'environ 3 heures. Cette durée est proche de la cadence d'arrivée des cuves au poste de nettoyage. Le second poste permet d'absorber les aléas de production ou l'immobilisation d'une cuve pour réparation par exemple. Avec la montée en cadence prévue pour Ariane 6, les cuves de propergol s'enchaîneront plus rapidement au bâtiment de nettoyage et les deux postes seront nécessaires si la durée nominale des opérations n'est pas diminuée. Ainsi le système doit potentiellement permettre le nettoyage des cuves sur les deux postes.

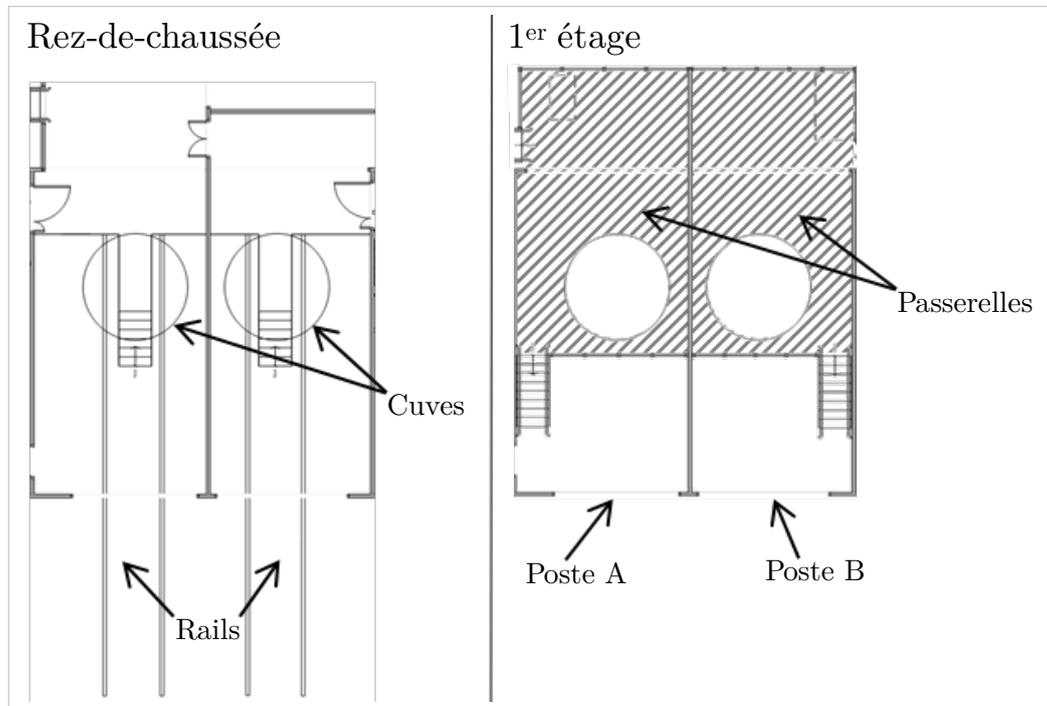


Figure 4.44 – Plan des deux postes de nettoyage des cuves "G" vue de dessus.

Les deux postes "G" sont identiques et sont aménagés de manière symétrique. Leur aménagement est par contre différent du poste "S". En Guyane le poste est étroit et les opérateurs disposent de peu d'espace autour de la cuve pour se déplacer. La passerelle à l'étage, sur laquelle les opérateurs se placent pour nettoyer la cuve depuis le haut, se lève pour accueillir la cuve. L'espace de l'atelier en Guyane est ainsi plus contraint qu'en France métropolitaine et l'implantation du système robot doit être étudiée attentivement.

L'enchaînement des opérations est similaire pour les postes "G" et "S". De même que sur le poste "S", plusieurs opérations sont réalisées avant et après le nettoyage de la cuve "G". La différence principale est la réalisation d'une opération supplémentaire sur le poste de Guyane. Après le retrait du couvercle et avant le nettoyage de la cuve, les opérateurs doivent retirer le piston de coulée qui est présent au fond de la cuve "G". Pour cela un pont présent dans chaque poste est utilisé pour retirer le piston ayant une masse de plus de 100 kg.

Suite aux discussions avec les opérateurs de Guyane nous avons noté qu'ils avaient une technique non pratiquée par les opérateurs de Saint-Médard pour limiter l'adhérence du propergol sur les raclettes : ils entourent la raclette d'un chiffon imbibé de plastifiant. Avec cette technique, le propergol se décroche facilement de la raclette et un seul chiffon suffit durant toute la durée du raclage. Cette technique permettrait de s'affranchir du besoin de nettoyer ou de changer de raclette au cours des opérations, que nous avons évoqué précédemment.

Enfin le propergol pour Ariane 5 en Guyane n'est pas le même que ceux présents dans les cuves "S" en France métropolitaine. Le propergol d'Ariane 5 est de couleur rouge, moins visqueux et moins pégué que les compositions mises en œuvre dans les cuves "S". Les opérateurs nous ont informé qu'il était plus facile à nettoyer. Les essais de nettoyage que nous avons menés avec le prototype (cf.

section 4.3.2) ont montré une efficacité satisfaisante sur un produit plus difficile à nettoyer. Nous avons donc considéré avec le groupe de travail que le système développé permettra le nettoyage du propergol de Guyane.

4.4.2 Adaptation du système cobotique pour le nettoyage des cuves de Guyane

Plusieurs études ont été menées pour adapter notre solution cobotique au nettoyage des cuves "G" et aux contraintes de production Ariane 5 et 6 en Guyane. Elles ont principalement consisté à :

- définir un système robot de dimension adaptée aux cuves "G", dont l'échelle est plus grande ;
- définir plusieurs scénarios de solutions pour respecter les cadences Ariane 5 et les futures cadences Ariane 6 ;
- étudier l'implantation du système robot dans le bâtiment et le placement du poste de commande ;
- s'orienter vers des technologies adaptées aux contraintes guyanaises et pyrotechniques.

Ces études sont résumées dans les sections suivantes.

4.4.2.1 Définition d'un système robot adapté à l'échelle des cuves "G"

La paroi interne des cuves "G" fait environ 3 m de diamètre et 2 m de haut. Le positionnement de l'outil sur l'ensemble des surfaces d'une cuve nécessite donc un robot industriel d'une portée supérieure à 2 m. Le robot Stäubli TX90XL utilisé pour le prototype avait une charge maximale théorique de 9 kg et nous l'avons utilisé proche des limites de ses capacités en force lors du raclage d'une couche d'un centimètre d'épaisseur de produit inerte. Pour pouvoir répondre aux situations où une épaisseur plus importante de propergol est présente en fond de cuve, nous nous orienterons vers des robots industriels ayant une charge utile de l'ordre de 50 kg.

Dans la mise en œuvre du prototype décrit précédemment, nous nous sommes limités à l'étude d'un robot industriel positionné sur une potence fixe au-dessus de la cuve. Nous avons défini au cours de simulations participatives de l'activité future du système cobotique – décrites dans la section 4.1.3 – le besoin de deux axes externes motorisés :

- un axe vertical pour placer le robot dans la cuve lors du nettoyage et le sortir lorsque la cuve doit être déplacée sur le rails de l'atelier ;
- et un axe horizontal pour placer le robot au-dessus de la cuve lors du nettoyage, pour le mettre en position de garage ailleurs dans l'atelier afin qu'il ne gêne pas lors d'opérations annexes telles que le nettoyage de l'atelier, et pour placer le robot dans une position accessible par les opérateurs pour son nettoyage ou sa maintenance.

Le système robot à définir pour la Guyane comprend ces axes supplémentaires qui devront être adaptés aux ateliers de nettoyage des cuves "G".

Pour définir un principe de solution dont les dimensions sont adaptés aux cuves "G", nous avons échangé avec Lucas France, constructeur d'axes linéaires porteurs de robots et distributeur des robots industriels Comau pour la France. Les échanges avec cette société avaient pour objectif d'étudier la faisabilité technique d'une solution, de préciser son dimensionnement et de définir une enveloppe de coût pour un système robot comprenant un robot industriel et des axes externes adaptés à l'échelle "G".

Nous avons ainsi défini un principe de solution basée sur le robot industriel Comau "NJ60 - 2.2", ayant une portée d'environ 2,2 m et une charge utile maximale de 60 kg. L'accessibilité du robot placé au centre de la cuve "G" aux parois à nettoyer est illustré sur la figure 4.45.

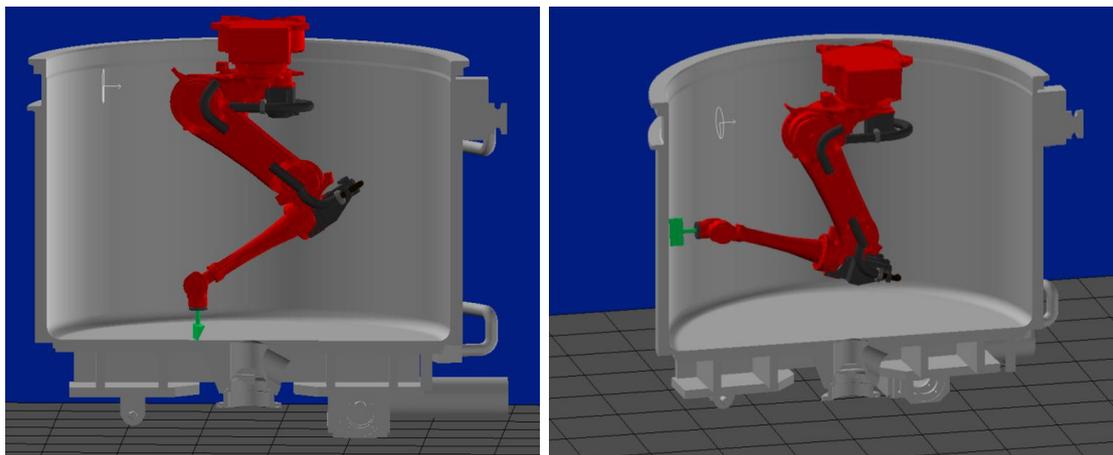


Figure 4.45 – Accessibilité du robot Comau "NJ60 - 2.2" dans une cuve "G".

Lucas France nous a proposé un premier modèle de module linéaire multi-axes aux dimensions de l'atelier "G" pouvant supporter la charge du robot Comau "NJ60 - 2.2" (voir figure 4.46). Ce modèle associé au robot manipulateur Comau a permis de conforter la faisabilité technique de la solution envisagée et d'y associer une enveloppe de coût. Notons que la structure des axes linéaires aura probablement une masse de plusieurs tonnes et que le bâtiment de nettoyage devra être adapté pour supporter une telle charge. La faisabilité de l'implantation d'un tel système dans le bâtiment existant a été étudiée par la suite et est décrite dans la section 4.4.2.3.

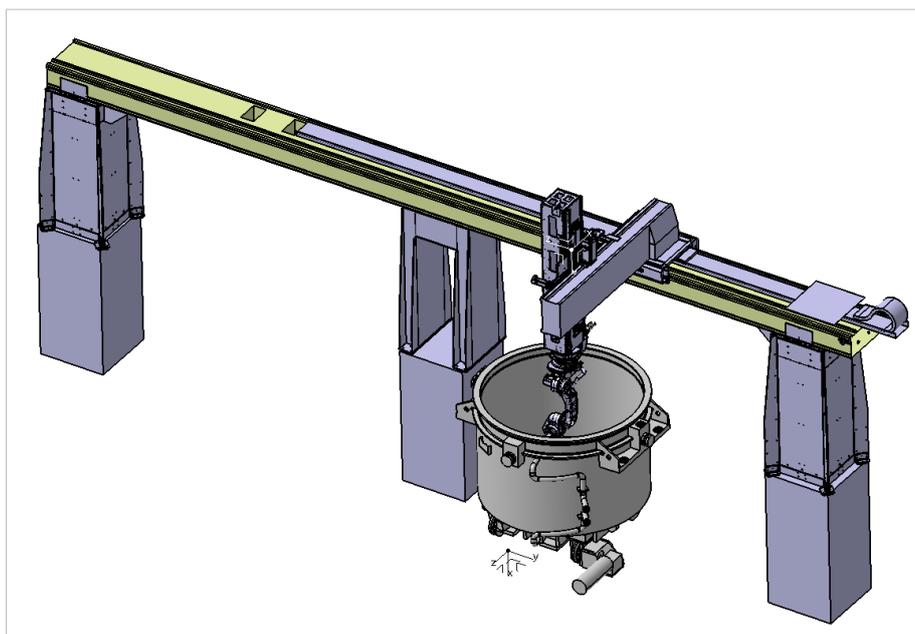


Figure 4.46 – Système robot composé des axes porteurs Lucas France et du robot industriel Comau pour le nettoyage des cuves "G".

4.4.2.2 Adaptation aux cadences Ariane 5 et 6

Nous avons étudié les cadences actuelles de production du propergol pour Ariane 5 et les cadences prévisionnelles pour Ariane 6, avec les experts de l'industrialisation des moyens en Guyane, afin de dimensionner le système de nettoyage. Si le système cobotique permettait d'envisager un gain de temps suffisant sur les opérations de nettoyage, alors l'utilisation d'un seul poste de travail pourrait être considérée. L'implantation du système de nettoyage sur un seul poste permettrait de réduire les coûts de conception, de fabrication, d'intégration, de qualification et d'exploitation du système.

Suite aux résultats du prototype, nous avons projeté avec le groupe de travail un gain de temps d'environ 20 minutes sur les opérations de nettoyage. Ce gain de temps permettrait d'envisager d'utiliser un seul poste "G" avec les cadences Ariane 5 actuelles. Cependant, avec la montée en cadence de la production du propergol Ariane 6, il est prévu que la durée entre l'arrivée de deux cuves consécutives au poste de nettoyage soit réduite de 30 minutes en moyenne. Des optimisations sur la durée des autres opérations du poste de travail seraient nécessaires pour tenir les futures cadences Ariane 6 avec un seul poste de travail. À ce stade, ces optimisations n'ont pas été étudiées et l'utilisation des deux postes de travail est considérée.

En conséquence, nous avons défini trois scénarios de conception pour assurer les opérations de nettoyage en respectant les futures cadences Ariane 6 :

- La première solution s'appuie sur l'implantation du système robot dans le bâtiment existant et sur l'utilisation d'un seul robot industriel pour les deux postes de nettoyage. L'axe externe horizontal traverserait les deux ateliers et pourrait transporter le robot industriel sur les deux postes²⁸.
- La deuxième solution s'appuie également sur l'implantation du système robot dans le bâtiment existant, mais en utilisant un robot industriel sur chaque poste de travail. Les deux ateliers seraient alors totalement découplés. Deux axes externes supplémentaires restent nécessaires pour déplacer chaque robot industriel à l'intérieur de chacun des ateliers.
- La troisième solution s'appuie sur la création d'un nouveau bâtiment spécifique pour les opérations de nettoyage de la cuve réalisées avec le système robot. Pour permettre le suivi des cadences Ariane 6, les ateliers existants seraient utilisés pour les autres opérations effectuées avant et après le nettoyage de la cuve. Cette solution a comme inconvénient d'ajouter un aller-retour pour chaque cuve entre les ateliers existants et le nouveau bâtiment. Elle a comme avantage de permettre la conception d'un nouvel atelier adapté au système robot pour faciliter son implantation.

Ces trois scénarios de solutions ont été considérés dans les études décrites dans les sections suivantes.

4.4.2.3 Étude d'implantation du système robot et du poste de commande

Les études précédentes ont permis de définir plusieurs scénarios de conception de la solution globale par rapport au bâtiment de nettoyage des cuves "G" existant, ainsi qu'un principe de solution de système robot aux dimensions adaptées à l'échelle des cuves et des postes de travail. En relation avec le bureau d'étude ArianeGroup et avec la société Lucas France, nous avons ensuite étudié l'implantation du système robot dans l'atelier de nettoyage des cuves en simulation numérique.

Pour commencer, nous avons choisi d'étudier l'implantation pour le premier scénario, où un axe porteur horizontal traverse les deux ateliers pour transporter le robot manipulateur sur les deux postes de nettoyage. Les contraintes principales pour l'implantation du système robot sont les suivantes :

- La structure du bâtiment doit pouvoir supporter la masse du système.
- La structure du système ne doit pas gêner les opérateurs lors des opérations effectuées avant et après le nettoyage de la cuve.
- En particulier, la passerelle doit pouvoir être ouverte pour réaliser la mise à poste de la cuve et le piston doit pouvoir être retiré au pont avant le nettoyage de la cuve.
- Les opérations de nettoyage doivent pouvoir être effectuées manuellement, comme actuellement, en cas de panne du système.
- En particulier, les opérateurs doivent pouvoir continuer à se déplacer sans encombre tout autour de la cuve sur la passerelle.
- Pour la sécurité en cas d'incident pyrotechnique, le système ne doit pas gêner le passage des opérateurs vers les issues de fuite des ateliers.

28. Cette solution peut être envisagée même lorsque les deux postes sont occupés par une cuve car le nettoyage de la cuve n'est qu'une partie des opérations réalisées sur le poste de travail. Ainsi l'étude des cycles a montré que la mobilisation du robot sur l'un des deux postes n'est pas gênante, car les opérations effectuées sur l'autre poste de travail ne nécessitent pas le robot à ce moment là.

- Les deux ateliers doivent rester découplés d'un point de vue pyrotechnique lors des opérations.

La structure des axes porteurs pouvant avoir une masse de plusieurs tonnes, les murs du bâtiment de nettoyage ne seraient pas adaptés pour supporter une telle charge. La structure devra ainsi être reprise au sol à l'aide de piliers. Les modifications du bâtiment seront prises en compte pour permettre au sol de supporter la charge de la structure du système robot. Avec le bureau d'étude ArianeGroup et la société Lucas France nous avons affiné le système robot. Celui-ci serait composé d'un premier axe horizontal traversant les deux ateliers et supporté par trois piliers²⁹. Le second axe vertical se déplacerait le long du premier. Le robot industriel serait placé sous le second axe en montage plafond. Cette solution positionnée dans l'atelier de nettoyage des cuves "G" est illustrée sur la figure 4.47.

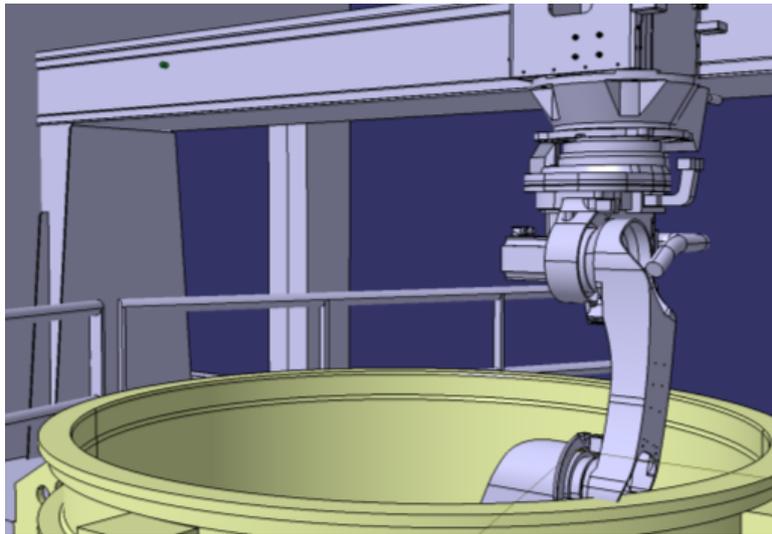


Figure 4.47 – Extrait d'une simulation du système robot implanté dans l'atelier de Guyane.

Nous avons proposé différentes implantations de cette solution pour que l'emplacement de l'axe horizontal permette le positionnement du robot manipulateur au-dessus de la cuve, tout en ne bloquant pas l'accessibilité au-dessus de celle-ci pour le retrait du piston au pont. Le placement des piliers de la structure des axes porteurs a été étudié pour limiter l'encombrement de l'atelier pour les déplacements des opérateurs et pour ne pas gêner le passage par les portes existantes. Des positions de garage du robot industriel ont été proposées dans et hors de l'atelier.

Cette étude préliminaire d'implantation du système robot dans le bâtiment existant a mis en évidence des difficultés pour positionner les piliers de la structure en limitant l'encombrement dans l'atelier. La réutilisation du bâtiment existant permet difficilement de trouver une solution idéale. Une première proposition d'implantation a été modélisée pour étudier son impact sur l'ensemble des opérations, au cours de simulations en réalité virtuelle avec le groupe de travail (voir section 4.4.3).

Notons que ce scénario de solution nécessiterait de remplacer une partie du mur séparant les deux ateliers de nettoyage par une porte coupe feu. Cette porte devra permettre le passage du robot entre les ateliers lorsqu'elle est ouverte et découpler les deux postes de nettoyage d'un point de vue pyrotechnique lorsqu'elle est fermée.

Pour le deuxième scénario de solution, avec un robot industriel par poste, nous avons envisagé deux configurations d'implantation :

- Deux structures indépendantes composées d'un axe porteur horizontal, d'un axe vertical et du robot industriel sont implantées dans chaque atelier. Dans ce cas, chaque axe vertical est supporté par deux piliers à ses extrémités. Le bâtiment doit alors accueillir un pilier supplémentaire par rapport au premier scénario, ce qui semble compliqué au vu du faible espace disponible dans chaque atelier.

29. Voir figure 4.46.

- L'axe porteur horizontal est commun aux deux systèmes et traverse le mur séparant les deux ateliers. Dans ce cas la solution est similaire au premier scénario, avec deux piliers aux extrémités et un pilier au milieu de l'axe horizontal. Les différences sont la présence d'un axe vertical et d'un robot manipulateur dans chaque atelier. Cette solution est très proche en terme d'implantation de la solution du premier scénario décrite précédemment. Cependant, il n'est plus nécessaire d'intégrer une porte coupe feu.

Ainsi l'implantation du deuxième scénario n'a pas été étudiée en détail, puisque nous pouvons faire des analogies avec l'implantation du premier scénario.

L'implantation du troisième scénario, où un nouveau bâtiment est créé pour le système robot, n'a pas été étudié car elle est peu contraignante. En effet, le nouveau bâtiment pourra être conçu de manière à être adapté à la structure du système robot. Si ce scénario était retenu, l'implantation du système robot serait étudié en parallèle de la définition du nouveau bâtiment.

Nous avons également étudié avec les exploitants de Guyane les possibilités de placement du poste de commande par rapport au bâtiment de nettoyage. Nous avons mis en évidence qu'il n'y avait pas de place dans le bâtiment pour accueillir le poste de commande et qu'il devra être créé à l'extérieur. Cependant le poste de commande devra être suffisamment proche de l'atelier de nettoyage pour limiter les déplacements des opérateurs et pour respecter la contrainte de longueur des câbles de puissance entre le robot et sa baie de commande.

4.4.2.4 Adaptation aux contraintes de conception pour la Guyane et pyrotechnique

La réalisation d'un système pour la Guyane présente des contraintes particulières car les ressources pour l'étude, la conception, la fabrication, l'intégration de la solution et pour le suivi du projet sont principalement implantées en métropole. La répartition des prochaines étapes de notre projet entre la France métropolitaine et la Guyane serait alors :

- La réalisation en métropole des études détaillées pour valider la solution finale, de la fabrication du système et des premiers essais de qualification à l'échelle des cuves "G".
- Le transport en Guyane du système.
- La réalisation en Guyane de la modification du bâtiment existant ou de la création d'un nouveau bâtiment.
- L'intégration en Guyane du système dans le bâtiment de nettoyage.
- Les réglages et les essais de qualification du système cobotique sur le poste en Guyane.
- La formation du personnel de Guyane.
- La mise en production du nouveau système de nettoyage en Guyane.

L'ensemble des étapes réalisées en Guyane nécessitent des déplacements de personnes qualifiés de métropole pour assurer le suivi, les développements, les essais, les formations et la mise en production.

L'industrialisation est ainsi plus complexe et coûteuse pour un système étant implanté en Guyane. Par ailleurs, en cas de panne du système robot l'intervention de l'intégrateur serait nécessaire. Les systèmes développés doivent être simples à utiliser, à maintenir et robustes pour minimiser les risques de panne pouvant bloquer la production et qui nécessitent des déplacements coûteux de l'intégrateur.

Durant le projet nous avons rencontré la société Haption qui commercialise les dispositifs haptiques développés pour l'industrie nucléaire en France afin d'échanger sur l'industrialisation de leur dispositif de téléopération. Cette technologie est récente et peu déployée dans l'industrie aujourd'hui, il existe donc peu de retour d'expérience sur sa fiabilité et sa robustesse sur le long terme. À ce jour, la seule application industrielle en fonctionnement des dispositifs d'Haption se trouve à l'usine de la Hague exploitée par AREVA NC, avec seulement 200 heures d'utilisation par dispositif depuis leur mise en œuvre. En concertation avec le groupe de travail nous avons actuellement choisi de privilégier le joystick comme dispositif de commande pour le nettoyage des cuves en téléopération pour plusieurs raisons :

- Le nettoyage des cuves nécessite des sollicitations physiques continues et répétées de la part des opérateurs. Pour la téléopération avec retour d'effort de ces opérations, le dispositif haptique devrait pouvoir résister à de telles sollicitations quotidiennement. Une telle robustesse sur le long terme n'a pas été démontrée à ce jour.
- Le Virtuose 6D TAO, qui est recommandé pour notre application du fait de son grand espace de travail et de son retour d'effort sur 6 degrés de liberté, a un coût d'achat³⁰ très élevé en regard de notre besoin.
- L'intégration de la téléopération à retour d'effort en milieu industriel nécessite de faire appel à des intégrateurs spécialisés pour réaliser des développements qui représentent un coût supplémentaire important (plusieurs centaines de milliers d'euros) au coût du système.
- Éprouver la première industrialisation d'un tel dispositif pour ArianeGroup en Guyane dans un milieu pyrotechnique présente un risque pour la production en cas de panne, étant donné le délais d'intervention nécessaire pour le déplacement de l'intégrateur spécialisé.
- Le choix du joystick rend le système de téléopération plus simple à développer, à industrialiser, à utiliser et à maintenir, ce qui réduit les coûts du système et le risque de pannes dues à son utilisation.

En plus des contraintes liées à l'éloignement de la Guyane par rapport à la France métropolitaine, les conditions climatiques de Guyane doivent être prises en compte pour la conception du système. Pour que le système robot soit implanté dans le bâtiment actuel de nettoyage des cuves "G", qui est ouvert sur l'environnement extérieur, le robot industriel et les axes porteurs devront résister à une hygrométrie pouvant dépasser les 95%. Le poste de commande devra être fermé et climatisé pour accueillir l'ordinateur, les écrans, le dispositif de commande et la baie de commande du système robot.

Enfin, les spécificités liées aux opérations pyrotechniques donnent également des contraintes sur la conception du système de nettoyage des cuves de propergol. Ces contraintes seront étudiées plus particulièrement durant les phases futures d'analyse des risques pyrotechniques réalisées en groupe de travail. Ces contraintes comprennent notamment la limitation des efforts exercés sur le propergol, la non génération de point chaud supérieur à 80°C et de contact électrique à proximité du produit ou encore la mise à la terre des équipements et outils pour éviter la génération de charges électrostatiques pouvant créer des arcs électriques. Pour y répondre des préconisations seront faites telles que l'utilisation d'un robot industriel étanche, le choix de moteurs limitant les échauffements et la mise en place de mesures pour limiter la projection de produit sur le système robot.

4.4.3 Simulation en réalité virtuelle de la solution

Nous avons présenté dans les sections précédentes les études menées pour adapter le système cobotique de nettoyage des cuves à l'environnement et aux contraintes de Guyane. Ces études ont permis de faire évoluer nos hypothèses de conception sur le système robot. Ces dernières sont synthétisées sur la figure 4.48.

Les capteurs externes comprennent un capteur d'effort 6 axes au niveau de l'effecteur du robot pour contrôler l'effort normal d'appui sur la surface de la cuve et pour maîtriser les efforts exercés sur le propergol. Les trois vues caméras que nous avons considérées jusqu'à présent sont conservées dans ce système. Les vues "cuve" et "outil" ont déjà été étudiées à l'échelle des cuves de Saint-Médard ; elles devront être optimisées vis-à-vis de la taille différente des cuves de Guyane. La vue "atelier" sera étudiée plus en détail par la suite. Comme sur les autres postes de supervision d'ArianeGroup, des microphones seront utilisés pour retransmettre les sons de l'atelier aux opérateurs dans le poste de commande.

Les contraintes d'industrialisation pour la Guyane nous ont orienté vers le choix d'un joystick 3 axes pour permettre aux opérateurs de commander le nettoyage en téléopération avec 3 degrés de liberté. La commande du robot avec le joystick sera affinée lors du développement du système final, en

30. De l'ordre de 80 000 euros.

même temps que l'interface de supervision. Suite aux simulations participatives, nous considérons que seules les étapes de raclage et de grattage seront réalisées avec le système cobotique ; la finition, qui ne présente pas de risque pyrotechnique, restera réalisée manuellement par les opérateurs pour conserver leur agilité et leur efficacité. Les outils de raclage et de grattage du système robot seront optimisés en même temps que les cycles automatiques de nettoyage, lors du développement du système final. Le robot industriel pourra avoir des spécifications comparables au Comau "NJ60 - 2.2". Ce robot serait déplacé dans le bâtiment de nettoyage et positionné au dessus de la cuve grâce à un module d'axes porteurs composé d'un axe horizontal et d'un axe vertical. L'implantation de ces axes porteurs reste à valider.

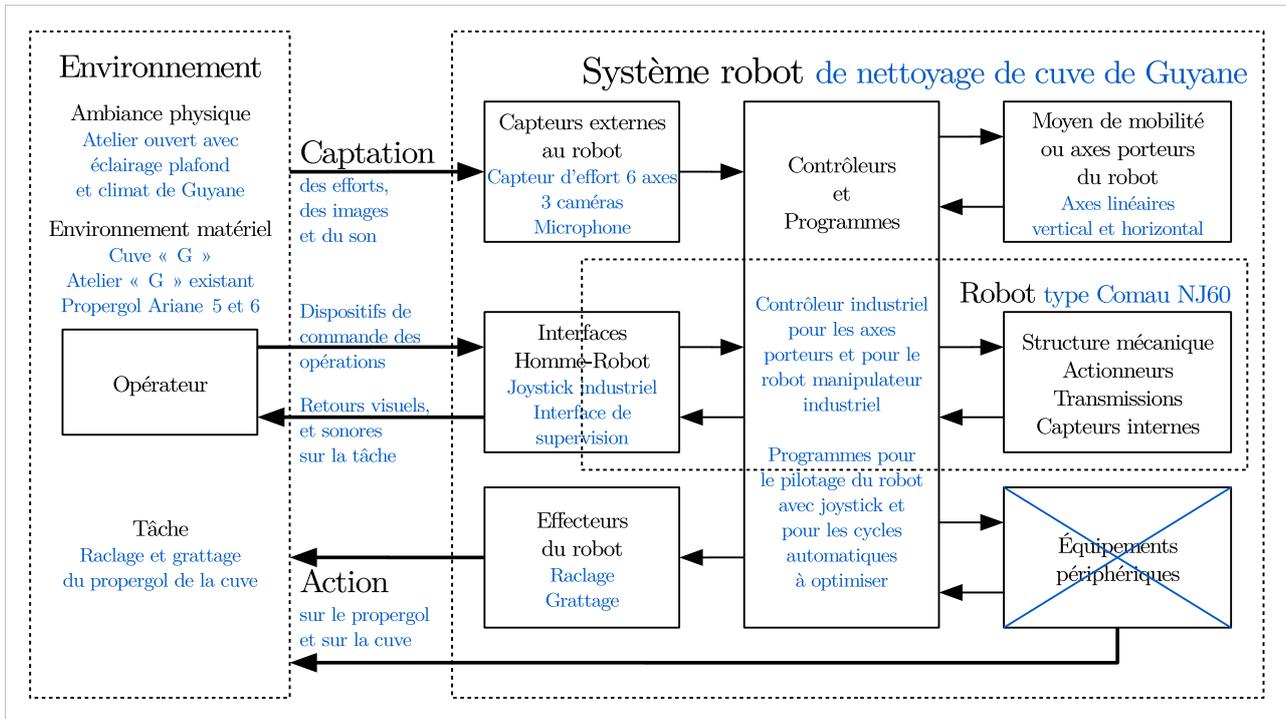


Figure 4.48 – Hypothèses de conception finales sur le système robot de nettoyage des cuves de propergol pour la Guyane. En noir, le modèle de base et, en bleu, les hypothèses de conception.

Suite à la définition de ce principe de solution à l'échelle des cuves "G", nous avons souhaité étudier son impact en fonctionnement sur la réalisation des opérations du poste de travail de Guyane. ArianeGroup dispose d'une pièce dédiée aux simulations en réalité virtuelle, équipée d'une salle immersive (ou "cave"). Cette salle immersive est composée de 5 écrans sur lesquels sont projetées des images 3D, permettant à un utilisateur équipé de lunettes 3D d'être immergé dans un environnement virtuel interactif. Cette salle de simulation en réalité virtuelle est représentée sur la figure 4.49. Nous avons ainsi adapté les modèles 3D de l'atelier de nettoyage des cuves "G" et du système robot pour permettre leur simulation en réalité virtuelle.



Figure 4.49 – Salle de réalité virtuelle d'ArianeGroup avec un "cave" 5 faces.

Ces moyens nous ont permis de réaliser des simulations participatives avec le groupe de travail. Pour cela nous avons définis des scénarios d'activité décrivant le fonctionnement, l'utilisation du système robot et l'activité des opérateurs lors du futur nettoyage des cuves "G". Nous avons réalisé des premières simulations (cf. figure 4.50) qui nous ont permis :

- D'immerger les personnes du groupe de travail dans l'environnement virtuel pour évaluer l'impact de l'implantation du système robot sur la réalisation des opérations.
- De mieux nous rendre compte des dimensions et de l'encombrement du système robot dans l'atelier pour améliorer son implantation.
- De dérouler l'enchaînement des opérations réalisées par les opérateurs et les cycles de fonctionnement du système robot dans l'atelier, en présence de l'ensemble du groupe de travail.

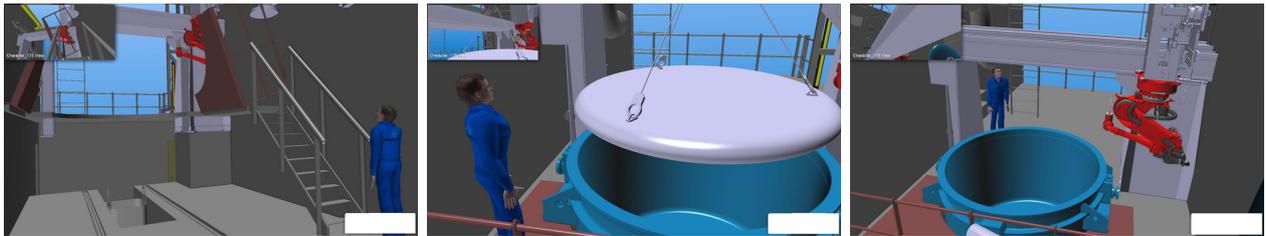


Figure 4.50 – Simulation en réalité virtuelle du système de nettoyage des cuves et de l'activité des opérateurs en Guyane.

Ces simulations ont mis en évidence des corrections à apporter sur l'implantation du système robot ou encore sur la position de garage définie. Par exemple, la position des piliers des axes porteurs gêne les déplacements des opérateurs sur la passerelle, de même que la position de garage du robot manipulateur définie.

Au moment de la rédaction de ce document, des modifications sont en cours sur l'implantation du système pour prendre en compte les améliorations proposées en groupe de travail. Les échanges avec la société Lucas France ont permis d'avoir une première proposition de dimensionnement du système robot. Une piste d'amélioration est l'optimisation du dimensionnement du système pour faciliter son implantation dans l'atelier existant.

Dans la suite du projet, nous prévoyons également d'immerger les opérateurs de Guyane pour évaluer de manière plus précise l'impact des solutions proposées sur leur activité de travail. Ces simulations serviront également de support pour présenter au client la solution cobotique proposée.

4.4.4 Chiffrage de la solution développée et perspectives du projet

Les études précédentes ont permis d'avancer dans la définition d'une solution technique pour le nettoyage des cuves en Guyane. Pour permettre la prise de décision d'investir dans la solution et dans les études détaillées pour la conception finale, il était nécessaire d'estimer les coûts associés au projet, au développement de la solution et à son implantation en Guyane.

Nous avons chiffré la solution avec le service des investissements d'ArianeGroup pour prendre en compte, en plus du coût du système robot, les coûts associés à son développement, à son transport en Guyane, à son implantation dans le bâtiment de nettoyage, à la création d'un poste de commande et à la qualification du moyen sur le poste de travail.

Ce chiffrage a été réalisé suivant les trois scénarios d'implantation pour estimer la solution la moins chère :

- Implantation d'un seul robot industriel pouvant se déplacer d'un poste de travail à l'autre.
- Implantation d'un robot industriel dans chacun des deux ateliers de nettoyage.
- Création d'un nouveau bâtiment pour accueillir le système robot et réaliser les opérations spécifiques au système robot.

Les coûts des deux premières solutions sont équivalents car l'achat et l'intégration d'un robot supplémentaire, pour la deuxième solution, est compensé par les coûts de modification du bâtiment pour permettre le passage du robot d'un atelier à l'autre, pour la première solution. La troisième solution engendre des coûts bien supérieurs en terme de génie civil et d'exploitation d'un nouveau bâtiment. Les deux premières solutions seront évaluées plus en détail dans la suite du projet.

Bien qu'aucun chiffre ne puisse être donné ici, nous pouvons noter que le coût d'achat du système robot correspond finalement à une part réduite du coût total. Les principaux coûts additionnels sont les heures de travail pour les études, le développement et la qualification du système, les coûts de transport du système et de déplacement des personnes en Guyane, et les coûts liés à la modification du bâtiment et à l'implantation du système.

Dans les semaines qui suivent la rédaction de ce document, nous allons reprendre en détail les choix techniques de la solution qui ont le plus fort impact sur les coûts globaux, afin d'optimiser la solution vis-à-vis des coûts. En particulier, les choix techniques sur le système vont être étudiés pour réduire son coût d'implantation, et pour simplifier les développements, l'analyse des risques pyrotechnique et les essais de qualification. Les résultats de l'étude technico-économique seront ensuite présentés au client qui décidera ou non de l'industrialisation du système en Guyane dans le cadre du programme Ariane 6.

Chapitre 5

Déploiement de la cobotique et de notre approche de conception

Durant notre thèse, nous avons eu l'opportunité de déployer notre approche de conception de systèmes cobotiques sur d'autres postes de travail au sein d'ArianeGroup, permettant de la confronter à divers cas d'application et de l'enrichir. Dans ce chapitre, nous commençons par résumer nos travaux sur les d'applications principales que nous avons étudiées en parallèle du poste de nettoyage des cuves (section 5.1). Pour donner un socle au déploiement de la cobotique chez Safran et ArianeGroup, nous avons développé un portail web "cobotique" sur l'intranet accessible par l'ensemble des personnes du groupe Safran. La structure de ce "portail collaboratif" et certains outils pour la conception que nous y avons partagés sont présentés dans la section 5.2. Le travail que nous avons mené tout au long de cette thèse nous permet de faire un retour d'expérience sur le déploiement de la cobotique au sein de Safran et d'ArianeGroup, ainsi que sur notre approche. Nous en discutons les résultats, les limites et les perspectives dans la section 5.3.

5.1 Applications de l'approche sur d'autres postes de travail

En parallèle du projet de nettoyage des cuves, nous avons testé notre démarche et développé d'autres systèmes cobotiques sur divers cas d'application. Dans cette section, nous présentons deux des sujets principaux pour la cobotique chez ArianeGroup. Pour le premier, nous avons évalué l'appropriation de notre approche par d'autres parties prenantes, en la transférant à des stagiaires d'école d'ingénieur¹ que nous avons formés et qui ont pu la mettre en œuvre sur le projet, sur des périodes variant de 4 à 6 mois. Pour le second sujet, bien que nous n'ayons commencé son étude que récemment, il présente un potentiel intéressant pour la cobotique. Nous en présentons les études préliminaires afin d'illustrer l'utilisation du modèle de système cobotique pour une solution de type comanipulation.

5.1.1 Finition des chargements de propergol

Nos communications aux sein d'ArianeGroup sur le développement d'un système cobotique pour le nettoyage des cuves de propergol a permis de faire émerger un nouveau sujet : l'amélioration du poste de finition des chargements de propergol. Une évaluation préliminaire du besoin en interne a mis en lumière l'intérêt de démarrer un projet de conception d'un système cobotique pour ce poste de travail. Dans cette section, nous résumons les travaux menés sur ce projet.

Une des particularités de ce projet est l'implication de stagiaires que nous avons formé à notre approche de conception et avec qui nous avons avancé sur le sujet. Le transfert de notre approche à d'autres parties prenantes nous a permis de la critiquer et de la faire évoluer.

1. En deuxième et en dernière année d'étude.

Présentation du besoin industriel

La finition s'inscrit dans le processus de production d'un chargement de propergol, à la suite de la phase de démoulage (voir figure 3.1 page 60). Cette opération consiste à retirer les surplus de propergol solide présents à l'intérieur du chargement. Ces surplus se présentent sous plusieurs formes : poussières, surépaisseurs et copeaux de tailles variées. Ils peuvent adhérer plus ou moins à la paroi interne et peuvent être situés à n'importe quel endroit dans le chargement (voir figure 5.1).

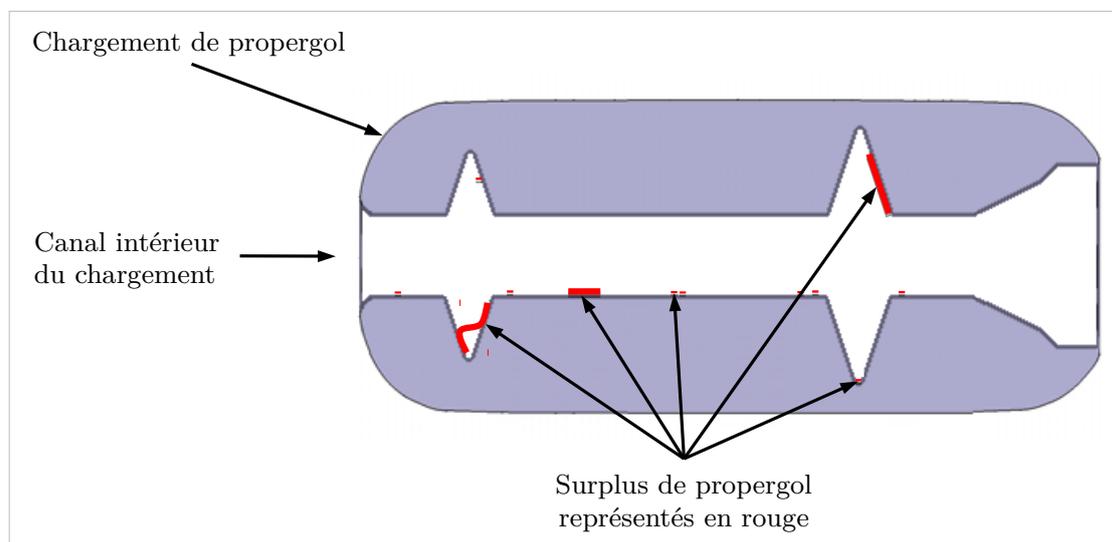


Figure 5.1 – Surplus de propergol solide à retirer du canal intérieur du chargement.

Les opérations de finition des chargements sont actuellement réalisées manuellement par deux opérateurs en même temps, sur plusieurs jours. La technique de retrait d'un surplus est choisie par l'opérateur qui, en fonction de ce qu'il perçoit, adapte sa tactique et ses actions. Les gestes doivent être maîtrisés afin de retirer les surplus sans générer de risque pyrotechnique et sans abîmer le chargement. Pour effectuer ces opérations pyrotechniques, les opérateurs sont placés à l'entrée du canal intérieur du chargement, au plus proche du propergol.

Suite à l'accident pyrotechnique ayant eu lieu en 2012, la politique de l'entreprise est de réaliser un maximum d'opérations pyrotechniques en plaçant les opérateurs à distance, dans un lieu sécurisé. L'enjeu est d'autant plus majeur sur ce poste que les opérateurs font face au chargement quasi-final et donc à une quantité très importante de propergol.

La production est donc à la recherche de solutions pour améliorer ce poste, principalement du point de vue de la sécurité des opérateurs. Ces opérations étant complexes et avec de fortes variabilités – notamment sur la quantité, le placement, la dimension et l'adhérence des surplus à retirer – les responsables ayant eu connaissance de nos travaux ont pensé à la cobotique pour conserver l'expertise des personnes sur ce poste, tout en améliorant leurs conditions de travail. Ce projet a ainsi été positionné dans ArianeGroup comme un des sujets les plus stratégiques de la cobotique.

Contributions

Afin d'évaluer le transfert de la méthodologie, et la façon dont d'autres parties prenantes pouvaient l'appliquer, nous avons recruté deux stagiaires pour travailler en binôme robotique/cognitique sur le sujet. La formation des stagiaires à la méthodologie s'est faite au fur et à mesure, en les accompagnant au quotidien. Nous avons également constitué un groupe de travail pour le projet, intégrant le chef d'atelier, un méthodiste du poste de travail, un représentant du CHSCT et les services procédés, industrialisation et de sécurité pyrotechnique.

L'analyse de l'activité effectuée par le binôme robotique/cognitique en stage a amené des résultats importants pour le projet :

- constatation des besoins en termes de sécurité, mais aussi mise en valeur du besoin de réduction du stress, de la pénibilité physique (manipulation prolongée de perches de plusieurs mètres) et de la fatigue visuelle ;
- étude de la diversité des situations et des stratégies des opérateurs ;
- recensement des outils utilisés par les opérateurs pour retirer les surplus de propergol : aspirateur, perches, couteaux de découpe et leurs mains ;
- élargissement du périmètre du projet en y ajoutant le contrôle final par endoscopie, réalisé sur un autre poste de travail et qu'il serait intéressant d'intégrer au système cobotique pour gagner en qualité et en temps de cycle.

Sur la base de cette analyse préliminaire, un premier principe de solution a été proposé. Les enjeux de sécurité pyrotechnique conduisant à placer les opérateurs à distance, le système cobotique proposé s'appuie une fois de plus sur un fonctionnement en supervision et téléopération. Ce principe de solution est représenté grâce à notre modèle de système cobotique sur la figure 5.2.

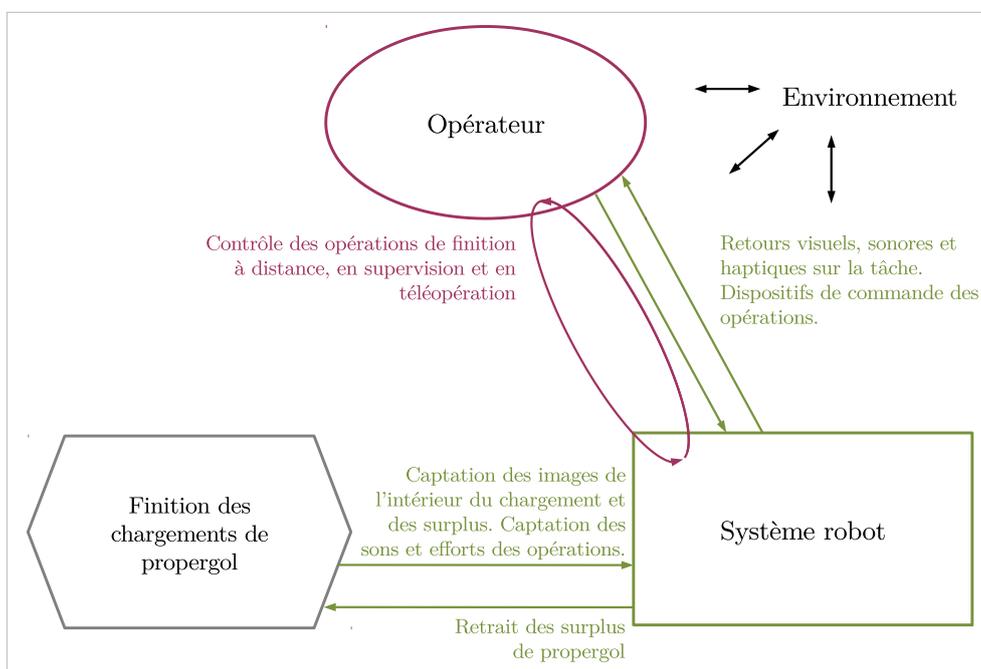


Figure 5.2 – Proposition de système cobotique pour la finition des chargements de propergol.

Nous pouvons noter que l'architecture globale de ce principe de solution cobotique est similaire à celle du système cobotique de nettoyage des cuves, puisque dans les deux cas les opérateurs réalisent les opérations à distance à travers le système robot. Ce sont des systèmes cobotiques de type téléopération.

Notre modèle de système robot a ensuite permis de formuler de premières hypothèses de conception sur une architecture robotique pouvant répondre aux besoins des opérateurs et aux contraintes de la tâche et de l'environnement (cf. figure 5.3).

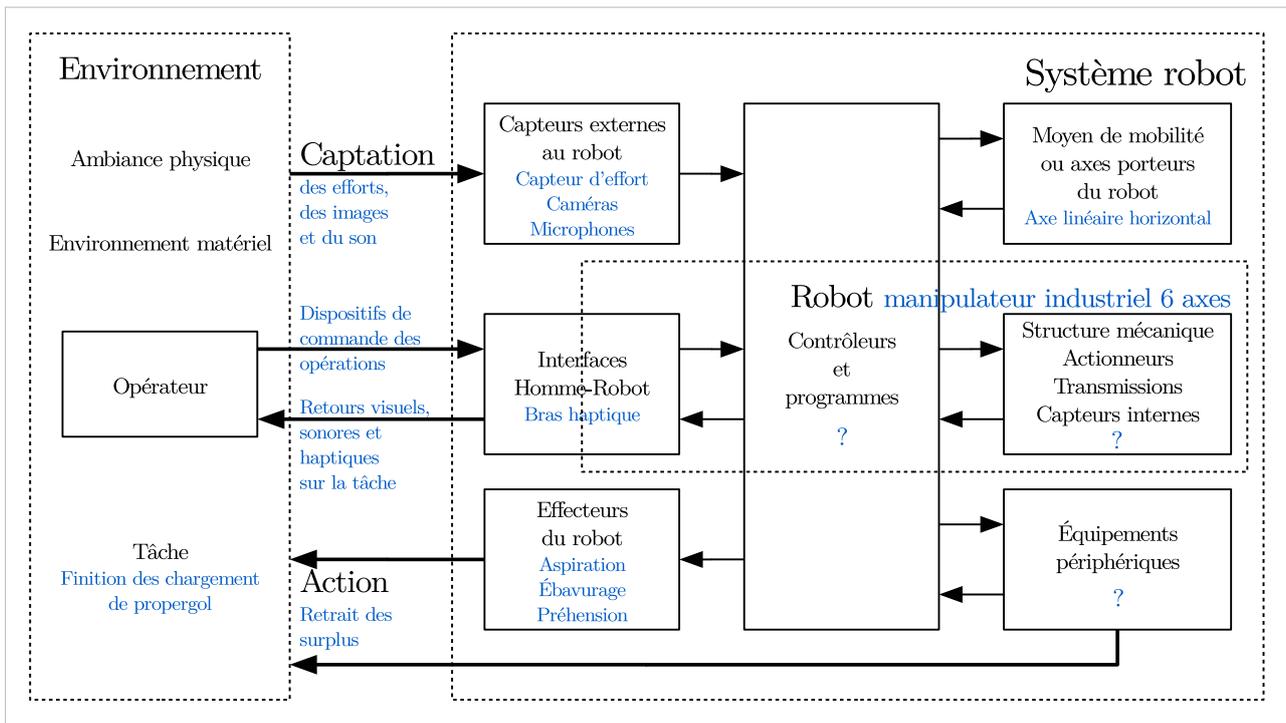


Figure 5.3 – Élaboration d’hypothèses de conception sur le système robot pour la finition des chargements de propegol. En noir, le modèle de base et, en bleu, les hypothèses de conception. Les " ? " représentent les éléments qui restent à déterminer.

Une fois de plus, le système robot devrait disposer d’un capteur d’effort, de caméras et de microphones pour retourner les informations correspondantes aux opérateurs placés dans un poste de commande. Les caméras permettraient à la fois de superviser les déplacements automatiques du robot, de téléopérer les opérations de finition et de réaliser le contrôle final par endoscopie. Dans un premier temps, des outils d’aspiration, d’ébavurage et de préhension similaires à ceux utilisés actuellement par les opérateurs sont considérés. Un robot manipulateur 6 axes aux dimensions adaptées à l’intérieur du canal, permettrait d’offrir la variété de mouvements nécessaires durant les opérations de finition à l’intérieur du chargement. Un axe linéaire serait nécessaire pour transporter le robot à l’intérieur du canal du chargement qui est étroit et qui mesure plusieurs mètres de long. Suite aux retours d’expérience sur le prototype de nettoyage des cuves, l’utilisation d’un bras haptique semble nécessaire pour permettre aux opérateurs de réaliser à distance ces opérations qui sont plus complexes.

Les discussions avec les opérateurs et le groupe de travail ont amenées à proposer d’ajouter un système de détection automatisé des surplus pour assister les opérateurs. Ce système permettrait de repérer automatiquement les défauts dans l’espace et de gagner du temps en automatisant le positionnement du robot en face d’un surplus à retirer. Les opérateurs utiliseraient alors le dispositif haptique pour réaliser les opérations de finition dans une enveloppe de travail réduite. Ce principe de solution est illustré sur la figure 5.4, qui a permis à l’ensemble des acteurs du projet d’en partager une représentation commune.

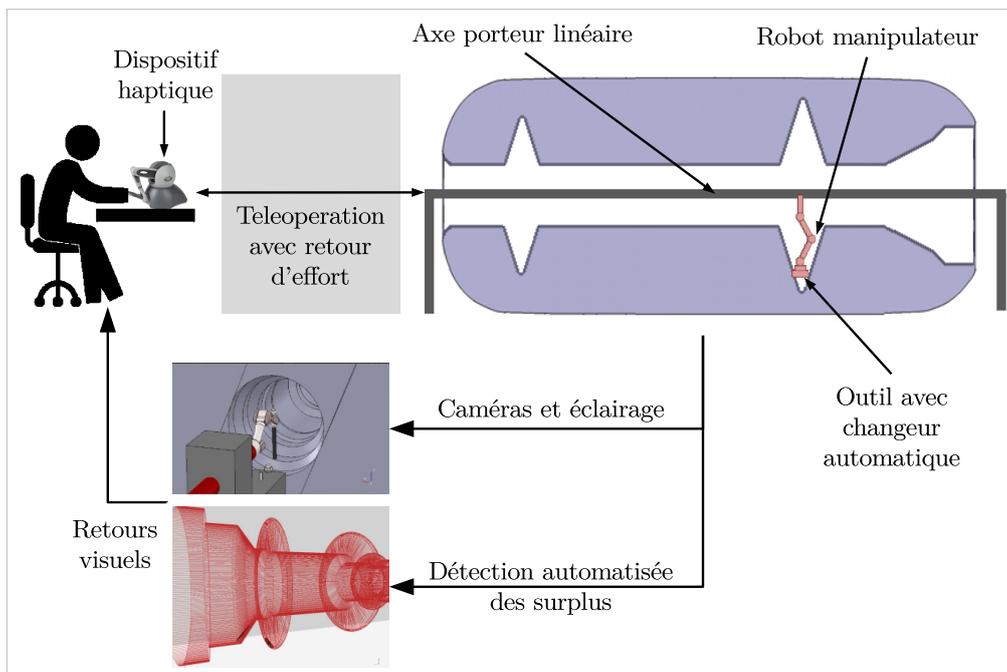


Figure 5.4 – Croquis du principe de solution pour la finition des chargements de propergol.

Une simulation numérique de ce système robot a été réalisée avec V-REP pour commencer à dimensionner le robot. La maquette numérique a également permis de conduire de premières simulations participatives avec les opérateurs pour évaluer les cycles de fonctionnement. Cette simulation est illustrée sur la figure 5.5. Le robot est placé au bout d'un axe linéaire (en rouge) pour faciliter son accessibilité à l'intérieur du chargement. L'effecteur (en noir) du robot est dimensionné pour atteindre le fond des cavités du canal traversant le chargement.

Ces simulations ont montré la difficulté technique de dimensionner un robot adapté aux différents chargements de propergol dont les dimensions et les formes internes varient. L'intérieur des chargements ayant une forme complexe, l'accès à certaines zones nécessitera des outils et des trajectoires spécifiques.

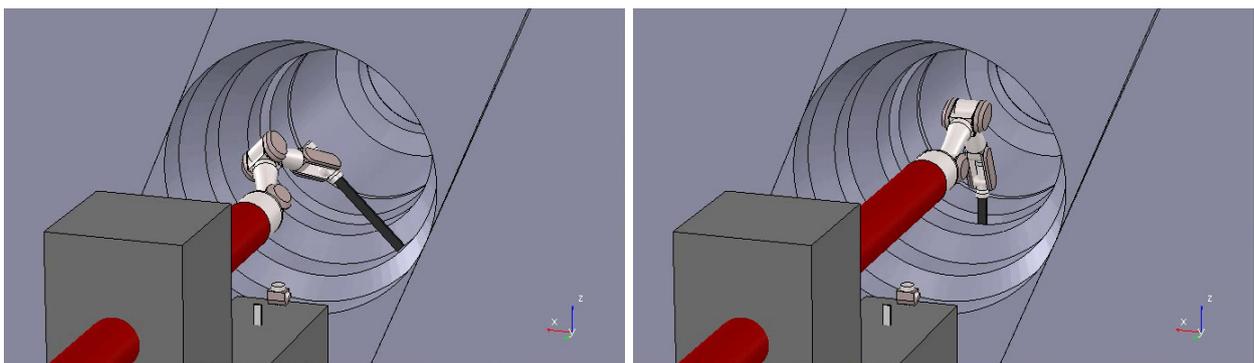


Figure 5.5 – Simulation d'opérations de retrait des surplus dans différentes zones d'un chargement de propergol.

Les responsables d'ArianeGroup étant convaincus de la pertinence de la téléopération pour ce poste de travail, nous avons obtenu des financements pour réaliser un démonstrateur. Ce démonstrateur a deux objectifs principaux :

- évaluer la faisabilité de réaliser les opérations de finition du chargement de propergol en téléopération avec un robot industriel ;
- et évaluer la détection automatisée des surplus de propergol avec différentes technologies.

Dans le cadre de ce démonstrateur, les essais seront effectués sur un bloc de produit solide inerte dont les propriétés mécaniques sont représentatives du propergol solide rencontré sur le poste de travail. Le principe du démonstrateur est illustré sur la figure 5.6.

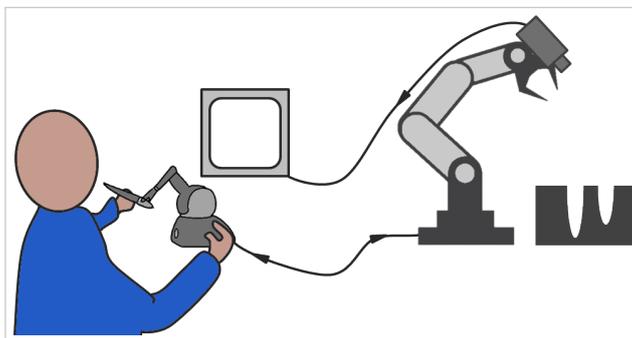


Figure 5.6 – Principe du démonstrateur cobotique que nous allons réaliser pour la finition des chargements.

L'opérateur pourra téléopérer un robot industriel qui porte des outils pour retirer les surplus solides de produit. Des capteurs placés au niveau de l'effecteur du robot fourniront des retours visuels et d'effort à l'opérateur pour piloter les opérations. Au moment de la rédaction de ce document, la réalisation du démonstrateur chez un fournisseur commencera dans les semaines à venir.

Les retours d'expérience des stagiaires ont montré la nécessité de disposer d'outils pour guider la conception et faciliter l'application de notre approche. Avec Théo Moulières-Seban, tout au long de nos thèses, nous avons ainsi optimisé différents outils qui jalonnent le processus de conception de systèmes cobotiques, à savoir :

- le modèle de l'homme au travail (figure 2.9, page 32) et la classification des déterminants de l'activité (figure 2.22, page 57) ;
- l'élaboration d'hypothèses de conception à partir des résultats de l'analyse préliminaire (figure 2.21, page 57) ;
- le modèle de système cobotique (figure 5.2) ;
- et le modèle de système robot (figure 5.3).

Un autre outil est présenté dans la thèse de Théo Moulières-Seban : le HIRL ("Human Integration Readiness Level"), un indicateur de l'intégration des opérateurs dans un projet de conception [MS17].

Perspectives du projet

Ce projet étant d'une grande importance pour les équipes de production, les étapes qui suivent le démonstrateur sont d'ores et déjà planifiées, et partiellement financées. En parallèle du développement du démonstrateur, nous allons définir les spécifications d'un prototype à l'échelle des chargements de propergol pour intégrer les contraintes dimensionnelles et les conditions d'éclairage réelles à l'intérieur du canal. Si la faisabilité de réaliser les opérations de finition du chargement du système cobotique en téléopération est avérée, le prototype à l'échelle 1 sera réalisé durant les mois qui suivront. Ce prototype, s'il est fonctionnel, sera industrialisé et implanté sur le poste de travail d'ArianeGroup dans les années à venir.

Suivant l'approche que nous avons présentée dans cette thèse, les opérateurs seront intégrés à chaque étape de la conception – dans l'élaboration des hypothèses de conception et à travers les simulations participatives – afin de vérifier la prise en compte de leurs besoins réels, pour proposer des améliorations et pour favoriser leur acceptation du système.

La forte mobilisation des responsables de production et de l'industrialisation sur ce projet a permis d'accroître la diffusion de la cobotique dans l'entreprise. De nouveaux projets potentiels ont ainsi été identifiés, dont celui présenté dans la section suivante.

5.1.2 Manutention des armatures

La manutention des "armatures" est une activité cours de conception par les équipes de production et d'industrialisation d'ArianeGroup. Elle consiste à saisir et déplacer des pièces appelées "armatures" entre plusieurs postes au sein d'un atelier. Ces pièces cylindriques sont compliquées à manipuler car elles sont fragiles, encombrantes et leurs dimensions sont variables. D'une référence à une autre, leur masse varie autour de 20 kg et leur diamètre varie autour de 1 m.

Les équipes d'ArianeGroup en charge de la conception de ce poste se sont tournées vers des intégrateurs qui ont proposé une solution basée sur l'utilisation d'un pont roulant avec un palonnier adaptable aux différentes armatures. Des simulations numériques des opérations dans l'atelier avec ce principe de solution ont été réalisées pour évaluer les cycles. Des essais ont également été menés avec le palonnier pour évaluer la faisabilité de saisir les armatures sans les abîmer (cf. figure 5.7).

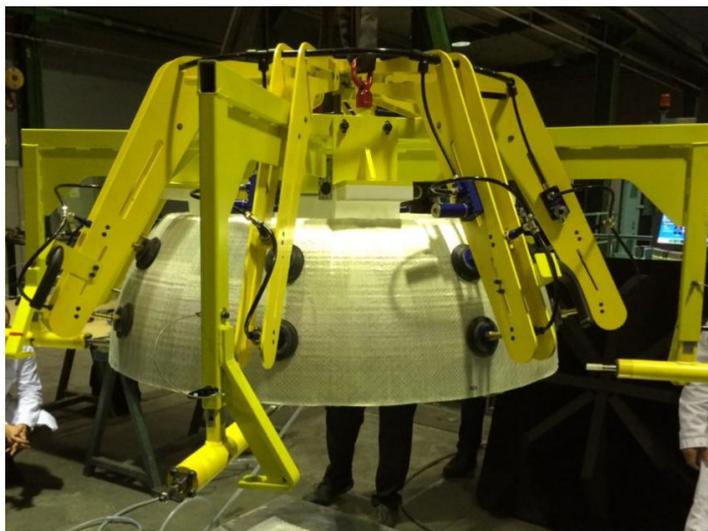


Figure 5.7 – Photographie d'un essai de manutention d'une armature à l'aide d'un palonnier spécifique.

Les résultats des simulations et des essais ont révélé plusieurs inconvénients pour les équipes d'ArianeGroup :

- Les opérations sont laborieuses avec le pont roulant et les temps de cycles sont trop élevés.
- Le palonnier est lourds, encombrant et fastidieux à utiliser.
- Le pont roulant devra être utilisé pour la manutention d'autres pièces qui nécessitent d'autres palonniers dont les changements augmentent les durées de cycle.

Un moyen dédié à la manutention des armatures est recherché pour gagner du temps de cycle et pour simplifier les opérations de manutention.

Nous avons alors été sollicités pour évaluer les possibilités offertes par la cobotique pour répondre au besoin des équipes de production et d'industrialisation d'ArianeGroup sur ce sujet. Le poste étant en cours de conception, nous n'avons pas pu analyser l'activité de manutention des armatures et nous avons analysé des situations de références sur des pièces similaires. À partir de ces analyses, des simulations des cycles futurs avec le pont, du plan d'implantation du futur atelier et des discussions avec les équipes de production, nous avons proposé un premier principe de solution cobotique (cf. figure 5.8). Nous l'avons accompagné d'une présentation de plusieurs types de technologies² et de leur collaboration possible avec l'homme pour mettre en valeur la diversité des solutions potentielles. Nous leur avons également présenté notre démarche pour avancer dans la conception du système cobotique.

2. Allant des dispositifs d'assistance passifs aux "robots collaboratifs", en passant par les cobots.

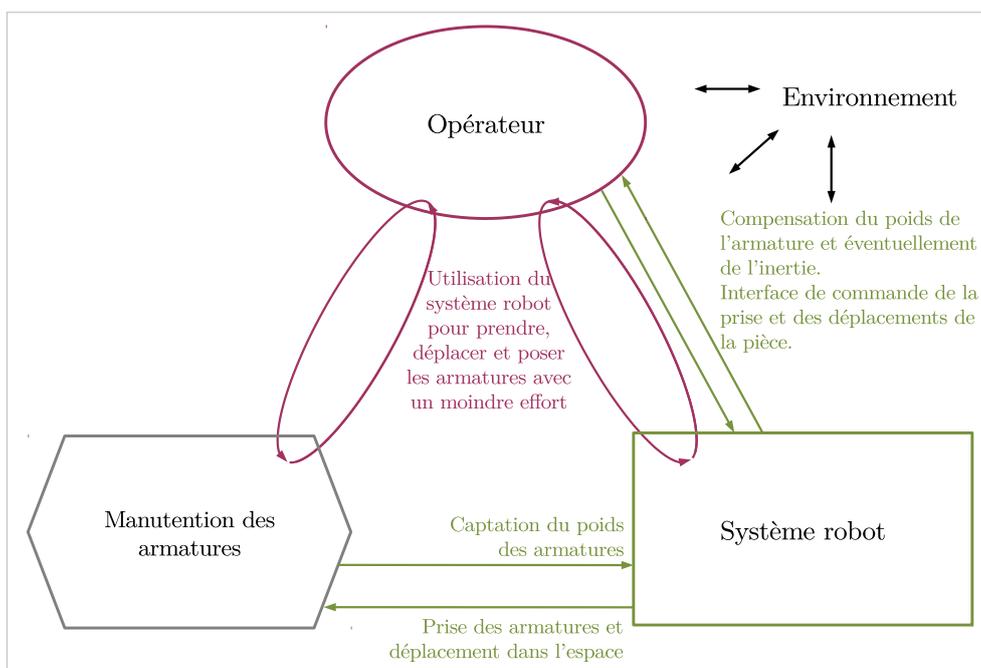


Figure 5.8 – Proposition de système cobotique pour la manutention des armatures.

Nous voyons sur ce modèle de système cobotique que l'activité de l'opérateur est liée directement au système robot et aux armatures. Cette architecture de système cobotique correspond à un système de comanipulation (voir figure 2.17 page 43). Avec un tel système cobotique il serait possible de simplifier la prise des armatures et de faciliter leur manutention pour les opérateurs, en compensant le poids de la pièce et éventuellement son inertie.

Au moment de la rédaction de ce document, les équipes de conception d'ArianeGroup affinent la définition du poste de travail ce qui permettra de préciser les hypothèses de conception sur le système robot. Un des enjeux sera notamment sur l'élaboration d'un outil moins encombrant et moins lourd que le palonnier pour la préhension des armatures. L'aménagement du poste de travail permettra également de clarifier le besoin de mobilité du système robot.

5.2 Développement d'un portail collaboratif "cobotique" et partage d'outils pour la conception

Safran possède un intranet sur lequel il est possible de développer des "portails collaboratifs" accessibles par l'ensemble des employés du groupe³. Un portail collaboratif permet à une communauté d'utilisateurs de partager des documents, d'échanger sur un fil de discussion et dispose d'outils pour faciliter la recherche et l'organisation de contenus au sein du site web.

Nous avons développé un portail collaboratif "cobotique" pour permettre les échanges entre l'ensemble des personnes intéressés par la cobotique au sein de Safran. Le portail est organisé de la manière suivante :

- Sur la page d'accueil, un fil d'actualité permet de publier de manière chronologique des informations auxquelles les utilisateurs de la communauté peuvent répondre.
- Un menu sur la colonne de gauche donne accès en permanence aux différentes pages et outils du portail.

Nous avons développé différents outils et bases de données pour guider la conception d'un système cobotique. Nous les avons rendu accessibles depuis le menu du portail afin qu'ils puissent être utilisés

3. Avant le regroupement de Safran Herakles et d'Airbus DS pour former ArianeGroup, cet intranet était également accessible aux employés de Safran Herakles où nous avons développé les cas d'application présentés dans cette thèse.

par l'ensemble des acteurs de la cobotique chez Safran. Deux de ces outils sont décrits dans les sections 5.2.1 et 5.2.2. Nous avons utilisé le fil d'actualité pour partager l'avancement des projets cobotiques dans Safran et pour communiquer lors de la mise à jour des outils et des bases de données.

En plus des partages autour du portail collaboratif, des journées ont été organisées de manière bi-annuelle pour rassembler les acteurs et les personnes intéressées par la cobotique chez Safran. Ces journées permettaient d'échanger plus longuement sur les projets cobotiques de chacun et de fédérer la communauté. Les rencontres avaient lieu à chaque fois sur un site différent de Safran pour découvrir une grande diversité d'installations et d'applications potentielles de la cobotique.

5.2.1 Aide au choix d'un type de système de travail

Lors de nos échanges avec des personnes intéressées par la cobotique au sein de Safran, un besoin souvent formulé par les concepteurs était de disposer d'un outil d'aide à la décision pour faciliter le choix entre un robot classique, un "robot collaboratif", un cobot, un simple manipulateur, ou d'autres dispositifs, à partir d'un certain nombre de critères.

Nous les avons mis en garde sur la nécessité d'effectuer une analyse détaillée de l'activité des opérateurs avant de réaliser un tel choix et que ce choix ne peut être validé qu'à travers de multiples itérations de conception et de simulations participatives. Cependant, il nous a semblé pertinent de développer un outil permettant de prendre connaissance des différents types de solutions envisageables. Nous avons catégorisé différents types de systèmes de travail en fonction des besoins pour l'opérateur et pour le robot. Le choix de ces critères est discuté dans la thèse de Théo Moulières-Seban, ainsi qu'une classification des robots par Coiffet dont nous nous sommes inspirés [Coi07] [MS17]. Les critères suivants ont été retenus :

- Pour l'homme : besoins en perception, en décision/planification et en action.
- Pour le robot : besoins en mobilité, en compréhension de l'environnement et en partage de l'espace de travail avec l'homme.

Nous avons commencé à implémenter l'outil sur le portail collaboratif "cobotique" (cf. figure 5.9). L'interface permet de spécifier l'expertise des opérateurs et les besoins pour le système robot. Une liste de systèmes de travail pouvant correspondre à ces besoins est ensuite présentée à l'utilisateur de l'outil.

Aide au choix d'un système de travail

 Cliquez sur **Aide** pour en savoir plus sur le fonctionnement de cet outil.

L'opérateur :

- perçoit : Toujours Parfois Jamais
- décide/planifie : Toujours Parfois Jamais
- a une expertise gestuelle : Toujours Parfois Jamais

Le moyen technique :

- est mobile : Fixe Mobile
- a une compréhension de l'environnement : Inutile Partielle/utile Poussée
- est colocalisé avec l'homme : Toujours Parfois Cas transitoires et dégradés

[Réinitialiser les choix](#)

Figure 5.9 – Capture d'écran de l'outil d'aide au choix du type de système de travail implémenté sur le portail "cobotique" de Safran.

Cet outil devra être évalué par différents experts en robotique, ergonomes, concepteurs ou encore chefs d'atelier. Nous n'avons, au moment de la rédaction de cette thèse, pas encore récolté les retours des utilisateurs potentiels. La liste des systèmes et leur classification sont conçues de façon empirique et doivent être améliorées puis validées.

5.2.2 Outil d'exploration des robots collaboratifs

La conception d'un système cobotique s'appuie d'une part sur l'analyse préliminaire⁴ pour définir les besoins des opérateurs, les contraintes de la tâche et de l'environnement, et d'autre part, sur un état de l'art des technologies pouvant composer le système robot pour collaborer avec l'homme en répondant aux contraintes définies. Au cours de nos nombreux échanges avec des concepteurs de poste de travail, nous avons pu constater le manque de connaissances des technologies émergentes permettant la collaboration homme-robot. Pour leur donner une vision de la variété des technologies existantes, nous avons mis en place sur le portail "cobotique" des bases de données des capteurs, effecteurs, dispositifs de commande et robots utilisables pour la collaboration homme-robot sur des tâches variées. Dans cette section, nous allons décrire un outil spécifique aux "robots collaboratifs", dont la base de données est la plus complète à ce jour.

Les "robots collaboratifs" sont des dispositifs pouvant être utilisés pour de la comanipulation ou pour de la collaboration en espace partagé. Depuis la mise à jour des normes ISO 10218-1:2011 et 10218-2:2011 encadrant et autorisant leur utilisation dans l'industrie, le marché des "robots collaboratifs" est en pleine effervescence. De nombreux modèles apparaissant chaque année, nous les avons recensés dans une base de données que nous mettons à jour régulièrement sur le portail "cobotique". Nous avons choisi un nombre réduit de critères pour caractériser, comparer et filtrer rapidement les différentes modèles.

Dans un premier temps nous avons choisi les critères suivants que l'on retrouve classiquement sur les fiches techniques des robots industriels :

- type (cartésien, SCARA, articulé, parallèle, bi-bras, mobile, hybride⁵);
- portée;
- charge utile;
- répétabilité;
- vitesse cartésienne maximum;
- application;
- nombre d'axes.

Cependant une telle quantité d'information rendait complexe la lecture de la base par les utilisateurs du portail et demandait du temps pour chaque ajout d'un "robot collaboratif". Pour faciliter l'alimentation, la maintenance et l'affichage de l'outil nous avons donc étudié les critères déterminants pour naviguer dans la base.

Pour cela, nous nous sommes orientés vers les catalogues internet des constructeurs de robots industriels qui proposent souvent de filtrer leurs robots suivant différents critères. Comme l'illustre le tableau 5.1, les caractéristiques des robots industriels les plus utilisées pour guider dans la sélection d'un robot sont la charge utile et la portée. L'application est également souvent utilisée comme critère de choix, car certains robots sont optimisés pour certaines tâches classiquement automatisées (voir section 2.1.1.2). Les autres critères que l'on peut trouver parfois sont le type d'industrie visée, la répétabilité, le nombre d'axes et la fixation (sol, mur, plafond ou autre) du robot. Les derniers critères qui sont utilisés plus rarement pour aider au choix d'un robot sont sa classe IP, son poids, son encombrement et son type.

4. Qui comprend notamment l'étude du poste et du travail prescrit, l'étude des postes amont et aval, et l'analyse de l'activité de travail des opérateurs.

5. Composé d'une partie mobile et d'un bras articulé par exemple.

Critères	ABB ^a	Comau ^b	Denso ^c	Fanuc ^d	Kuka ^e	Stäubli ^f	Universal Robots ^g	Yaskawa ^h
Charge utile	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Portée	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Applications	✓	✓		✓				✓
Industries		✓		✓				
Répétabilité		✓				✓		
Nombre d'axes			✓	✓				
Fixation			✓		✓			
Classe IP			✓					
Poids							✓	
Encombrement							✓	
Type								✓ ⁱ

a. <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/robot-selector>

b. <http://www.comau.com/EN/our-competences/robotics/robot-team>

c. <https://www.densorobotics-europe.com/fr/robots>

d. <http://www.fanuc.eu/fr/fr/robots/page-de-filtre-des-robots>

e. <https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/industrial-robots/>

f. <https://www.staubli.com/fr/robotique/robots-4-et-6-axes/tous-les-robots/>

g. <https://www.universal-robots.com/fr/produits/aidez-moi-%C3%A0-choisir/>

h. <https://www.yaskawa.eu.com/en/products/robotic/motoman-robots/>

i. Yaskawa recense les types suivants : articulé, "delta", bi-bras, SCARA. Le type "delta" est une forme de robot parallèle.

Tableau 5.1 – Critères de sélection des robots industriels retrouvés sur les sites web de grands constructeurs. Une coche (✓) indique que le constructeur propose le critère pour filtrer ses modèles de robots industriels.

Nous avons donc finalement retenu les critères de charge utile et de portée qui sont la première porte d'entrée dans la recherche d'un robot ⁶.

La recherche par application serait intéressante car les industriels qui recherchent des robots ont souvent une ou des applications en tête. Cependant ce critère présente plusieurs inconvénients. Tout d'abord, tous les constructeurs ne fournissent pas d'application privilégiée pour leurs robots et pour ceux qui en fournissent, le découpage par application n'est pas uniforme d'un constructeur à l'autre. Ensuite, c'est un critère fastidieux à remplir lors de l'ajout d'un robot dans la base qui alourdirait la maintenance de l'outil. Pour l'instant ce critère de recherche n'est donc pas implémenté. S'il devait l'être, il nécessiterait de choisir un découpage optimal des types d'applications pour faciliter l'ajout et la maintenance de l'outil, et pour être compatible avec ceux des différents fabricants de robots.

Si le choix par type de robot est peu répandu dans les critères de recherche des constructeurs, c'est notamment car chaque fabricant propose un nombre limité de types différents de robots. Lorsque l'on regroupe des robots de différents constructeurs dans une même base, ce critère devient intéressant ⁷ Nous avons donc conservé le filtre par type de robot.

Les autres critères sont plus spécifiques et ils n'ont pas été retenus. En effet, bien que ces derniers critères soient déterminants pour dans le choix d'un robot pour une application industrielle, notre outil n'a pas pour objectif de guider jusqu'au choix final du robot "idéal" en fonctions d'un nombre limité de critères initiaux. Cet outil est simplement un premier point d'entrée pour prendre connaissance des "robots collaboratifs" existants et de leurs caractéristiques principales.

Pour améliorer l'outil, nous l'avons également lié à une seconde base de vidéos qui contient des exemples de fonctionnement des robots collaboratifs présents dans la première base. Ces exemples sont de différentes natures : vidéo de démonstration du constructeur, application industrielle en fonctionnement ou vidéo issue de la recherche (donnant une idée de potentiels futurs usages industriels de

6. Surtout pour les manipulateurs. Pour les robots mobiles c'est plutôt la charge utile qui est recherchée.

7. On retrouve ainsi ce critère parmi les filtres de recherche des robots industriels sur le site web de Direct Industry qui rassemble différentes marques (<http://www.directindustry.fr/fabricant-industriel/robot-85494.html?>).

ces robots). Nous avons généré automatiquement à partir de la référence du robot dans la première base un lien vers la seconde base filtrant les vidéos suivant cette référence. Ce lien a été ajouté aux colonnes de la base de données des "robots collaboratifs" afin d'être redirigé facilement vers des vidéos d'exemple de fonctionnement des robots sélectionnés.

Cet outil est déjà implémenté sur le portail collaboratif "cobotique" de Safran (voir figure 5.10). Il est donc accessible par l'ensemble des personnes du groupe Safran et est utilisé par les personnes de la communauté "cobotique". Actuellement nous continuons à alimenter les différentes bases de données et nous avons prévu de mener prochainement des études sur l'utilisation de l'outil afin de l'améliorer.

Robots collaboratifs

+ nouveau document ou faire glisser des fichiers ici

Tous les robots Miniatures Par type / By type ... Rechercher un fichier ENREGISTRER CET AFFICHAGE

✓ Miniature	Reference	Fournisseur / Supplier	Robot type ▼	Payload (kg) ↓	Portée / Reach (mm)	Exemples
	AURA	Comau	Articulé / Articulated	110		Vidéos exemple AURA
	CR-35iA	Fanuc	Articulé / Articulated	35	1,813	Vidéos exemple CR-35iA
	LBR iiwa 14 R820	KUKA	Articulé / Articulated	14	820	Vidéos exemple LBR iiwa 14 R820
	Roberta 3	ABB	Articulé / Articulated	12	1,200	Vidéos exemple Roberta 3
	Speedy 12	MABI Robotics	Articulé / Articulated	12	1,250	Vidéos exemple Speedy 12
	UR 10	Universal Robots	Articulé / Articulated	10	1,300	Vidéos exemple UR 10

Figure 5.10 – Extrait de l'outil d'exploration des "robots collaboratifs" implémenté sur le portail "cobotique" de Safran. Les robots sont filtrés suivant le type "articulé" et triés par charge utile décroissante. Les six premiers résultats sont présentés.

5.3 Discussions sur notre approche et sur le développement de la cobotique

Dans cette partie, nous commençons par faire un bilan sur notre approche interdisciplinaire pour la conception de systèmes cobotiques, dans la section 5.3.1. Ensuite, dans la section 5.3.2 nous nous attardons sur les résultats et limites de son application dans des projets industriels. Nous poursuivons en faisant un retour d'expérience sur la diffusion de notre approche méthodologique et de la cobotique

au sein d'ArianeGroup et Safran, ainsi qu'à l'extérieur, dans la section 5.3.3 Nous terminons par discuter les perspectives liées à la cobotique et à ses évolutions dans la section 5.3.4.

5.3.1 Interdisciplinarité de l'approche et concepts développés

Dans cette thèse, nous avons présenté une approche de conception des systèmes cobotiques, que nous avons définis et modélisés. Cette approche est le fruit d'une construction interdisciplinaire qui a évolué au cours du temps. Initialement, l'organisation s'appuyait sur une équipe pluridisciplinaire avec un ingénieur doctorant en cognitique, un ingénieur doctorant en robotique, le responsable de l'ergonomie du groupe Safran et différentes parties prenantes en fonction des projets. Avec l'avancement de nos recherches, de nos développements et de leurs applications, nos connaissances ont évolué, chacun apprenant des disciplines des autres. Cette collaboration étroite entre des personnes issues de différentes disciplines a permis de faire émerger de nouvelles connaissances et de nouveaux concepts interdisciplinaires sur la cobotique⁸. L'équipe initialement pluridisciplinaire – c'est-à-dire chacun étant spécialisé dans des disciplines différentes – a évolué en équipe interdisciplinaire spécialiste de la cobotique, partageant de nouvelles connaissances communes sur la collaboration homme-robot. C'est cette équipe interdisciplinaire qui a permis de faire face aux problématiques de la cobotique qui sont par essence transdisciplinaires [Cla10]. En bilan de notre expérience, nous illustrons cette interdisciplinarité et les contributions principales des différentes disciplines sur la figure 5.11.

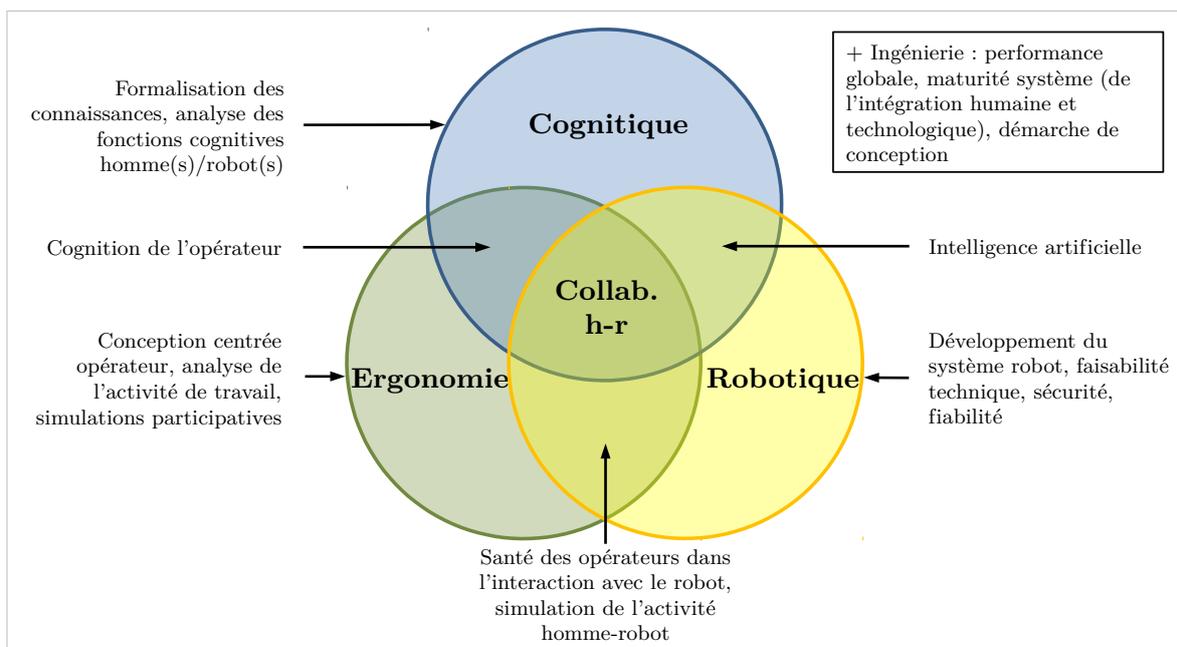


Figure 5.11 – Bilan des contributions principales de la cognitique, de la robotique, de l'ergonomie et de l'ingénierie pour la conception des systèmes cobotiques. La réunion de ces différentes disciplines permet d'avoir une approche globale pour développer la collaboration homme-robot (indiquée par "collab. h-r" sur ce schéma).

La cognitique s'intéresse au traitement de la connaissance humaine et informatisée ; cette science nous a notamment apporté des méthodes pour la formalisation des connaissances et pour l'analyse des fonctions cognitives de l'homme et du robot. Ces aspects sont détaillés plus spécifiquement dans la thèse de Théo Moulières-Seban [MS17], ingénieur doctorant en cognitique.

L'ergonomie a produit des méthodes éprouvées dans l'industrie pour intégrer les opérateurs dans la conception à l'aide notamment de l'analyse de leur activité de travail et des simulations participatives. Les concepts et méthodes de l'ergonomie sont solidement encrés dans les travaux de cette thèse et de

⁸. Ces résultats, tel que le concept de système cobotique et ses applications, sont décrits dans cette thèse et dans celle de mon binôme doctorant Théo Moulières-Seban [MS17].

celle de Théo Moulières-Seban ; ils sont décrits de manière complémentaire dans nos documents de thèse respectifs. Notre expérience a montré l'importance de l'analyse de l'activité de travail des opérateurs et des simulations participatives pour concevoir un système cobotique intégrant leurs besoins réels en situation de travail et pour faire face aux variabilités. Ces deux piliers sont indispensables pour la réalisation d'un projet en cobotique puisque l'expertise des opérateurs est au cœur du fonctionnement d'un système cobotique. Nous avons également observé au cours des projets que nous avons menés, qu'en plus d'intégrer leurs besoins, le fait de faire prendre part les opérateurs à la conception les rends plus favorables à la transformation de leur activité et de leur poste de travail. Les opérateurs que nous avons rencontrés ont même été souvent moteurs du développement du système cobotique.

La robotique est centrée sur la conception des systèmes robots et s'intéresse notamment à la faisabilité technique, à la sécurité et à la fiabilité des systèmes développés. Dans cette thèse, un modèle des systèmes robots a été proposé pour caractériser l'ensemble des éléments à prendre en compte dans leur conception (cf. figure 2.8 page 28). Nous avons appliqué ce modèle tout au long de la conception d'un système pour le nettoyage des cuves de propergol (chapitre 4) et pour l'élaboration des premières hypothèses de conception sur des projets plus récents tel que celui de finition des chargements de propergol (section 5.1.1). Ce modèle s'est montré très intéressant pour vérifier que les différents composants du système robot ont été considérés et pour mettre en lumière ceux qu'il reste à étudier au fur et à mesure de la conception. Il présente également l'avantage de fournir une visualisation rapide de l'architecture globale du système robot et de son fonctionnement au sein de son environnement. Il est ainsi complémentaire du modèle de système cobotique car il détaille les éléments du système robot.

Comme on le voit sur la figure 5.11, au croisement des différentes disciplines émergent des concepts tels que la cognition de l'opérateur, qui est détaillée dans la thèse de Théo Moulières-Seban, et l'intelligence artificielle qui n'est pas présente dans nos applications actuelles mais qui offre des perspectives pour le futur de la cobotique (cf. section 5.3.4). Dans cette thèse, nous avons plus particulièrement proposé et utilisé des concepts au croisement de l'ergonomie et de la robotique :

- la formalisation de l'analyse de l'activité de travail des opérateurs pour élaborer des hypothèses de conception sur l'activité future homme-robot (cf. figure 2.21 page 57) ;
- et la simulation de cette activité homme-robot au cours des simulations participatives.

Les simulations participatives s'appuient sur des scénarios et sur des outils de simulation (cf. section 2.3.3.1). Les scénarios nous ont permis de décrire la tâche à accomplir, l'activité des opérateurs et le fonctionnement du système robot. Les outils de simulation permettent de représenter les pièces, le système robot et les situations de travail (cf. tableau 2.5 page 53). Les simulations participatives nous ont ainsi permis d'étudier les interactions homme-robot.

Lors de la préparation des simulations participatives, l'intervention d'un spécialiste en robotique à l'élaboration des scénarios – classiquement réalisés par les ergonomes à partir de l'analyse de l'activité de travail [GTJM01] – permet de vérifier la représentativité du fonctionnement donné au système robot. Réciproquement, la contribution d'un ergonome à l'élaboration des modèles de simulation – que ce soit une maquette en carton, une simulation numérique ou un prototype – permet de valider l'intégration des déterminants de l'activité de l'activité de travail des opérateurs.

Nous avons étudié la collaboration homme-robot dans l'industrie en réunissant des compétences en cognitive, en ergonomie et en robotique, que nous avons associées à l'ingénierie des systèmes pour la prise en compte de la performance globale, de la maturité du système et pour la démarche de conception [MS17]. Les échanges entre l'ensemble de ces disciplines ont fait évoluer nos connaissances et nous ont permis de proposer conjointement le modèle de système cobotique (cf. figure 2.15 page 42). Ce modèle est un support pratique pour proposer une architecture globale donnant les relations entre l'homme, le robot et la tâche. Il est ainsi possible de mettre en valeur visuellement le type de système cobotique proposé : téléopération, colocalisation collaborative, comanipulation ou exomanipulation (voir figure 2.17 page 43).

Dans nos différents projets, ce modèle s'est avérée très utile pour élaborer des hypothèses de conception globales sur la structure et sur le fonctionnement du système cobotique. Le modèle de système

robot permettait alors de proposer des choix techniques et un fonctionnement du robot pour y répondre. L'utilisation combinée du modèle de système cobotique et du modèle de système robot offre un support opérationnel pour la conception, nous l'avons illustré dans cette thèse.

L'approche et les modèles associés n'abordent pas les systèmes au sein desquels plusieurs hommes et robots collaborent. On peut imaginer que les développements exposés dans ce document s'y appliquent, puisque la démarche ne présente pas de spécificité vis-à-vis du nombre d'agents. Cependant, la complexité du système augmentant, de nouvelles difficultés sont susceptibles d'apparaître. L'utilisation des modèles de système cobotique et de système robot dans le cadre où plusieurs hommes et robots doivent collaborer sera certainement évalué dans de futurs projets.

5.3.2 Application de la démarche dans des projets industriels

Au cours de notre thèse, nous avons appliqué la démarche de conception proposée à plusieurs cas d'étude. Le projet de nettoyage des cuves de propergol, détaillé dans les chapitres 3 et 4, a permis de développer de façon opérationnelle l'approche méthodologique depuis l'étude du besoin industriel jusqu'aux premières phases d'industrialisation d'une solution. Nous avons donc conduit de bout en bout les phases intermédiaires d'analyse préliminaire et de conception. Cela nous a permis d'étudier la mise en œuvre pratique de l'analyse de l'activité de travail des opérateurs et des simulations participatives pour la conception d'un système cobotique. Les concepts que nous avons construits au cours de cette thèse découlent ainsi conjointement d'une démarche de recherche scientifique et d'une application opérationnelle dans l'industrie.

En outre, nous avons confronté notre démarche et ces concepts à d'autres cas d'application avec une diversité de contraintes industrielles et de solutions potentielles. Deux d'entre eux ont été présentés au début de ce chapitre, dans la section 5.1. En particulier, au cours du projet de finition des chargements de propergol, décrit dans la section 5.1.1, nous avons évalué le transfert de notre approche méthodologique à des stagiaires que nous avons formés. Nous l'avons donc faite évoluer en fonction des critiques et des difficultés rencontrées dans la pratique, en proposant notamment des outils pour faciliter son application et guider la conception.

Cependant, à ce jour nous n'avons pas mené de projet jusqu'à la mise en production du système cobotique développé. Notre démarche doit donc encore être évaluée sur les phases suivantes d'industrialisation. Ces phases comprennent notamment :

- le développement du système final avec un intégrateur ;
- les premiers essais de qualification du système cobotique chez l'intégrateur ;
- l'approvisionnement et l'intégration du système sur le poste de travail ;
- les réglages et la qualification du système sur le poste de travail ;
- la formation des opérateurs ;
- la production en série.

Après la mise en production, l'activité de travail des opérateurs sur le nouveau poste devra être analysée pour éventuellement ajuster la solution à leurs besoins. Le système cobotique pourra ainsi continuer à évoluer avec les retours d'expérience des opérateurs.

Un des points structurant pour l'application de notre démarche est l'implication de l'ensemble des acteurs dès le début du projet. Nous avons vu la nécessité de l'intégration et des échanges réguliers entre des compétences en robotique, en ergonomie et en cognitive pour la conception d'un système cobotique. Ces compétences ne sont pas toujours disponibles au sein d'une entreprise. Si elles peuvent être externalisées, le pilotage du projet et l'organisation des échanges avec les autres acteurs du projet est déterminante pour sa réussite. De manière plus globale, l'équipe projet doit être construite en mobilisant des représentants de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre, des concepteurs, des représentants des futurs exploitants ou utilisateurs (opérateurs, maintenance) et les instances représentatives du personnel (le CHSCT par exemple) [GTJM01].

Dans l'industrie, les opérateurs sont généralement mobilisés par les demandes de la production et il peut être difficile de les impliquer dans un projet de conception. Lors d'un projet de création ou de transformation d'un poste de travail, ce sont généralement les concepteurs rattachés au secteur de production qui sont impliqués. Or, bien que ces derniers aient connaissance du travail prescrit et des objectifs de la tâche à réaliser, ils n'ont généralement pas conscience de l'ensemble des besoins réels des opérateurs sur le terrain. L'implication des opérateurs, notamment à travers l'analyse de leur activité de travail⁹ et les simulations participatives, est nécessaire pour la conception d'un système cobotique et doit être cadrée au début du projet.

Une des difficultés principales que nous avons rencontrée sur l'ensemble de nos projets est la recherche de financements. La plupart de nos projets ont été guidés par un besoin premier d'améliorer la sécurité et la santé des opérateurs au poste de travail. Malgré cela, afin d'obtenir des financements pour avancer dans la conception, il nous était demandé de justifier le ROI, c'est-à-dire les retombées économiques potentielles de l'investissement dans une solution cobotique¹⁰.

Plusieurs difficultés ont ainsi été soulevées :

- nous avons principalement travaillé sur des projets d'amélioration d'un poste existant, qui fonctionne donc actuellement sans solution cobotique et pour lesquels peu de financements sont alloués en général ;
- nous avons étudié des solutions innovantes, dont le déploiement dans l'industrie est nouveau et pour lesquelles nous avons peu de retours d'expérience sur les coûts de développement et d'industrialisation ;
- puisque le travail des opérateurs est maintenu, un retour sur investissement positif nécessite une réduction notable des durées de cycles en production ;
- notre démarche passe par la réalisation des phases d'analyse de l'activité de travail des opérateurs et de simulations participatives, en impliquant des compétences en robotique, ergonomie et cognitive dans le projet, ce qui peut présenter un coût initial supplémentaire en terme d'heures d'étude.

Ces phases supplémentaires sont cependant justifiées car elles permettent de fiabiliser la solution développée tout au long du projet. Cela vise à réduire le risque d'ajouter des coûts élevés en fin de projet pour modifier une solution qui se révèle inadaptée, voire d'aboutir sur un système qui ne fonctionne pas ou ne sera pas utilisé. Ainsi les frais engagés en début de projet pour les heures d'études, et pour les maquettes et prototypes, sont généralement négligeables devant ceux mobilisés en fin de projet pour rattraper des erreurs de conception.

Nous avons principalement réalisé des projets tels que le nettoyage des cuves et la finition des chargements de propegol, pour lesquels la montée en maturité d'une solution cobotique s'étale sur plusieurs années. Plus récemment, nous avons commencé à travailler sur des nouveaux projets pour lesquels une solution est recherchée pour une mise en production dans l'année. Ces projets nécessitent de rechercher des solutions matures "sur catalogue", qui doivent être adaptées au travail des opérateurs et aux contraintes des postes de travail. À partir de notre expérience, nous avons ainsi commencé à adapter notre démarche pour proposer rapidement des solutions potentielles.

Depuis peu de temps, nous avons également commencé à travailler sur des projets de création d'un nouveau poste de travail. Cela nous a permis d'évaluer notre approche dans des conditions différentes en étant impliqué dès le début dans un projet disposant de financements établis, ce qui laisse plus de marge de manœuvre pour la conception. Il est alors nécessaire d'adapter notre approche, notamment en analysant l'activité de travail des opérateurs sur des situations de référence ou en simulant les activités sur le poste en cours de conception.

9. Lors de la création d'un nouveau poste de travail et qu'il n'y a pas encore d'activité à analyser, il est toujours possible d'analyser des situations de référence qui s'en rapprochent [Dan04].

10. Notons que ces difficultés de financement sont intrinsèques à l'ensemble des projets dont les objectifs premiers ne sont pas l'amélioration de la productivité et la réduction des coûts récurrents pour l'entreprise.

5.3.3 Diffusion de la méthodologie et de la cobotique

Tout au long de nos thèses, avec Théo Moulières-Seban, nous avons effectué de nombreuses communications au sein d'ArianeGroup, de Safran et à l'extérieur pour présenter les opportunités offertes par la cobotique dans l'industrie et notre démarche de conception des systèmes cobotiques. Pour ces communications nous nous sommes appuyés sur la formalisation de notre approche et sur la conceptualisation d'outils pour la conception, et les avons fait évoluer selon les retours qui nous étaient fait.

Ces communications ont été variées (cf. chapitre "Productions scientifiques et techniques" page 169) :

- démonstrations avec le prototype de nettoyage des cuves ;
- présentations aux différents services et équipes de Safran et d'ArianeGroup ;
- partages de retours d'expérience avec les divers groupes de travail sur la cobotique au sein de Safran et d'ArianeGroup ;
- présentations et échanges lors des réunions mensuelles et des journées annuelles des communautés "ergonomie", "robotique" et "cobotique" de Safran ;
- discussions au cours de visites de sites industriels ;
- partages sur le portail collaboratif "cobotique" de Safran ;
- présentations lors d'événements majeurs d'ArianeGroup face à un large public ;
- échanges avec d'autres sociétés telles que PSA, Michelin et Airbus ;
- présentations dans des conférences.

Un des aboutissements de nos travaux et de ces communications a été l'inscription de la cobotique parmi les axes majeurs du projet "usine du futur" d'ArianeGroup, au début de l'année 2017. Ce projet est un grand plan de développement des technologies clés pour la société. La cobotique dispose depuis de financements dédiés pour son déploiement dans la société. Un groupe de travail a alors été constitué – couvrant les différents sites et secteurs de production (spatial, aéronautique, militaire, civil) de l'entreprise – pour développer de nouveaux projets sur le thème de la cobotique. Avec Théo Moulières-Seban, nous avons été embauchés par ArianeGroup pour en mener les projets.

Des visites de l'ensemble des sites d'ArianeGroup ont été organisées pour présenter les perspectives offertes par la cobotique et lister un ensemble de cas d'application potentiels. À ce jour, plus de 30 sujets ont été recensés et sont à l'étude par le groupe de travail sur la cobotique dont nous sommes les moteurs avec Théo Moulières-Seban. En particulier, nous avons réalisé l'analyse du besoin d'une dizaine d'entre eux et avons proposé des premiers principes de solution reflétant des systèmes cobotiques de type comanipulation et colocalisation collaborative. Ces projets sont en cours de développement avec nos interlocuteurs et ont confirmé la pertinence de l'approche de conception des systèmes cobotiques que nous avons proposé dans cette thèse. Nous avons ainsi des perspectives pour déployer notre démarche sur un ensemble d'applications variées et pour continuer à l'enrichir sur le long terme au sein d'ArianeGroup.

Au sein de Safran, un recensement des sujets potentiels pour la cobotique a également été réalisé. Actuellement, plus de 120 sujets ont retenu l'attention du groupe de travail cobotique Safran, avec qui nous avons gardé d'étroites relations.

Une des perspectives de notre étude est maintenant le déploiement à grande échelle de notre démarche de conception des systèmes cobotiques au sein des grands groupes industriels que sont Safran et ArianeGroup. De nouvelles questions s'imposent à nous. Comment cibler les postes à étudier en priorité? Comment mener en parallèle un grand nombre de projets cobotiques sur différents sites industriels avec des structures, des besoins et des contraintes variées?

La démarche et les concepts que nous avons proposés dans cette thèse fournissent une base de réponse et nous seront certainement amenés à les faire évoluer pour répondre à ces besoins nouveaux. Nous envisageons notamment de créer un guide référentiel pour former d'autres personnes à notre démarche et faciliter le déploiement à plus grande échelle de la cobotique au sein de Safran et d'ArianeGroup.

5.3.4 Types de systèmes cobotiques étudiés et perspectives de la cobotique

Nos travaux au sein d'ArianeGroup ont porté principalement sur des systèmes de téléopération jusqu'à présent. Cela a permis à ArianeGroup de monter en maturité sur ces systèmes qui présentent des enjeux stratégiques pour l'entreprise et ses postes pyrotechniques. Le développement de la cobotique sur le site de Saint Médard s'inscrit dans la lignée de la politique de sécuriser les opérations pyrotechniques puisqu'elle permet de conserver l'expertise des opérateurs tout en les éloignant des risques pyrotechniques.

Cependant nos travaux ne se sont pas limités à la téléopération. Lors de chacune de nos communications nous avons illustré le potentiel de la cobotique avec les quatre types de systèmes cobotiques présentés dans cette thèse : téléopération, colocalisation collaborative, comanipulation et exomanipulation (cf. figure 2.17 page 43). Des nouveaux sujets ont émergé au sein de Safran et ArianeGroup sur d'autres types d'applications que les postes pyrotechniques. Nous avons ainsi pu commencer à étudier des solutions de type comanipulation (comme pour le poste de manutention des armatures présenté dans la section 5.1.2) et colocalisation collaborative. L'exomanipulation étant considérée comme insuffisamment mature par Safran pour une application immédiate dans l'industrie, puisque le port d'exosquelettes peut avoir des effets à long terme sur la santé des opérateurs qui sont méconnus, nous n'en avons pas étudié d'application à ce jour.

Sur nos différents cas d'étude, nous avons évalué l'application de notre approche. Bien qu'elle n'ait pas été menée à un stade aussi avancé que le nettoyage des cuves sur les autres projets, nous avons réussi à appliquer notre démarche quel que soit le type de système cobotique envisagé. En effet, notre démarche ne présente pas de spécificité liée au type de système cobotique conçu. Les difficultés que nous avons rencontrées ont plutôt été liées à la structuration des projets et aux possibilités d'impliquer les opérateurs dans la conception. Nous avons ainsi enrichi notre approche et nos concepts de nos expériences diverses, que ce soit sur des projets où nous avons été impliqué dès le début ou au cours de la conception.

Nos travaux sur la cobotique s'inscrivent dans le cadre du développement de l'usine du futur. Cela est vrai aussi bien au sein d'ArianeGroup que plus largement dans l'industrie. La cobotique accompagne les autres technologies de l'usine du futur telles que la réalité augmentée, l'internet des objets, le big data et l'intelligence artificielle pour transformer les moyens de production [Fed15]. Ces évolutions majeures de l'industrie soulèvent de nouveaux enjeux, en particulier en terme de cybersécurité.

Si dans le passé les robots fonctionnaient isolés des hommes et de tout réseau, à l'avenir ils seront amenés à travailler aux côtés des hommes tout en étant connectés au réseau informatique de l'entreprise¹¹. Ils seront donc sujets aux cyberattaques, ce qui pourra présenter des risques pour la sécurité des opérateurs avec lesquels ils collaboreront et pour la production des entreprises. Un rapport récent de Trend Micro et de l'École polytechnique de Milan [MQP⁺17] présente différents risques associés aux cyberattaques des robots industriels, tels que l'introduction de défauts de fabrication invisibles à l'œil nu, l'espionnage industriel ou la désactivation des mesures de sécurité protégeant les opérateurs. La cybersécurité sera donc un enjeu de taille pour l'intégration de la cobotique dans l'usine du futur connectée.

L'évolution des technologies va ouvrir de nouvelles perspectives pour la cobotique. Actuellement la finesse des interactions homme-robot en comanipulation et en téléopération sont limitées pour les robots dont l'inertie est élevée. Les progrès sur les capteurs, les dispositifs de commande, la modélisation et le contrôle des robots permettront d'avoir des interactions plus fines et plus naturelles en dépassant ces limites.

Le développement de certaines modalités d'interactions encore peu répandues dans l'industrie, telles

11. La spécification "OPC Unified Architecture" (<https://opcfoundation.org/about/what-is-opc/>) a été développée depuis 2008 pour offrir un protocole de communication unifié pour l'ensemble des robots, machines et composants au sein de l'usine du futur.

que celles basées sur la parole et les gestes, étendra les possibilités de la cobotique avec d'autres supports de communication entre l'homme et le robot. Actuellement l'interaction par la parole avec une machine est limitée à l'envoi de commande à l'aide de mots-clés énoncés par l'homme. À l'avenir on peut imaginer que les hommes et les robots pourront dialoguer en langage naturel grâce à l'évolution des technologies de reconnaissance et de synthèse vocale, et de l'intelligence artificielle. La communication homme-robot par des gestes reste aujourd'hui très basique. Les applications actuelles s'appuient sur un lexique réduit de gestes simples partagé par l'homme et le robot, qui est établi à l'avance [GMH⁺13]. L'amélioration des capteurs et du traitement de l'information permettra certainement aux robots de discerner un plus grand nombre de gestes, avec plus de subtilité.

L'intelligence artificielle permettra de rendre les robots plus autonomes, afin de collaborer avec les hommes à plus haut niveau. Avec l'amélioration de cette autonomie et des techniques d'apprentissage mutuel homme-robot [NLR15], l'homme et le robot pourront élaborer un nouveau vocabulaire partagé, adapté à la réalisation d'une tâche, et le faire évoluer continuellement pour collaborer plus efficacement. La collaboration et l'apprentissage homme-robot pourront alors s'apparenter à celles mises en œuvre au sein d'une équipe d'hommes.

Pour être adoptées ces évolutions technologiques devront être accompagnées sur les plans humain et éthique. Sur le plan humain, les opérateurs qui seront amenés à collaborer avec des robots au sein de systèmes cobotiques pourraient voir leur compétences évoluer. En effet, pour réaliser une tâche efficacement et en sécurité un opérateur devra avoir connaissance des capacités et des limites du robot à l'aider. En fonction de la complexité et de l'autonomie du robot, la formation d'un opérateur au fonctionnement d'un robot et à la réalisation d'une tâche en collaboration avec celui-ci pourrait être plus ou moins longue. Notre approche s'appuie sur la mobilisation de l'expertise des opérateurs au sein du système cobotique afin de simplifier le système robot et son utilisation. Cependant une vigilance devra être portée sur les compétences demandées aux opérateurs avec la croissance potentielle de l'autonomie des systèmes robots à l'avenir. Ce besoin est confirmé par l'apparition d'initiatives telles que "Industrie 4.h"¹² qui vise à accompagner les acteurs des projets de l'usine du futur pour prendre en compte la dimension humaine dans ces changements.

Sur le plan éthique, ces évolutions des technologies et de la cobotique posent plusieurs questions qui dépassent le monde de l'industrie :

- L'autonomie des robots augmentant ils pourront être amenés à prendre des décisions importantes avec l'accord ou non de l'homme. Quelle cadre peut être donné aux capacités de décision des robots et à la confiance de l'homme en la machine ? Qui est responsable lorsqu'une décision prise par le robot a des conséquences graves telles que des dommages causés à l'homme ou à l'environnement ?
- Avec l'évolution des technologies, le robot pourra devenir un réel coéquipier de l'homme au travail. Quelles pourraient être les conséquences sociales à long terme d'un attachement des hommes à leur compagnon robot ? Y aura-t-il des risques de dépendance aux robots qui pourraient interférer avec les relations humaines ?
- D'autres formes de systèmes cobotiques s'appuieront à l'avenir sur des dispositifs robotiques augmentant les capacités physique de l'homme, tels que les exosquelettes. Cela pose la question de la réversibilité de l'usage de ces dispositifs. Quelles sont les limites données à l'intégration de ces dispositifs sur l'homme ? Un homme "augmenté" pourra-t-il et souhaitera-t-il se séparer d'un dispositif lui donnant des capacités accrues ?
- La collaboration avec l'homme permettra au robot de collecter des données susceptibles d'être personnelles. Comment seront traitées et utilisées ces données pouvant relever de la vie privée des individus ?

12. <https://www.anact.fr/industrie-4h-pour-mieux-integrer-le-facteur-humain-dans-les-projets-industrie-du-futur>

Ces questions sont abordées dans des rapports de la CERNA¹³ [Com14] et de la COMEST¹⁴ [Com17], et de premiers éléments de réponse y sont proposés. Le traitement de ces questions sera déterminant pour l'adoption des évolutions potentielles de la cobotique que nous venons de discuter.

13. Commission de réflexion sur l'éthique de la recherche en sciences et technologies du numérique d'Allistene (CERNA). Allistene est l'alliance des sciences et technologies du numérique.

14. Commission mondiale d'éthique des connaissances scientifiques et des technologies (COMEST).

Chapitre 6

Conclusion

Depuis des décennies, les robots industriels sont déployés dans les usines pour automatiser des tâches qui sont dangereuses, pénibles ou sans intérêt pour l'homme¹, ou lorsque cela procure un avantage économique à l'entreprise. L'évolution des technologies et des connaissances en robotique a permis de passer de tâches simples et répétitives à des tâches de plus en plus compliquées. Actuellement, une des limites de la robotisation des postes de travail est la complexité des tâches à réaliser. Certaines d'entre elles nécessitent une forte expertise de l'opérateur et une capacité d'adaptation qui ne sont pas automatisables avec les technologies disponibles ou dont le développement d'une solution complètement automatisée serait trop coûteux.

Jusqu'à présent, les approches de robotisation adoptées ont généralement cherché à substituer les opérateurs par des machines, en réduisant le travail de l'homme à un ensemble de fonctions dont le robot doit être doté. Ces approches prennent rarement en compte le travail réel des opérateurs. Ceux-ci régulent de manière plus ou moins consciente des variabilités industrielles souvent imprévues et s'adaptent aux évolutions des situations. Le remplacement des opérateurs par un système robot n'étant pas prévu pour faire face à ces variabilités va alors occasionner des cas de panne, des besoins de modification et de reprogrammation du système, qui impliquent des arrêts de production coûteux pour l'entreprise, avec des taux d'engagement du système bien en deçà des objectifs de rentabilité.

Une voie alternative au remplacement du travail humain par celui de la machine est apparue depuis quelques années : la collaboration homme-robot. Celle-ci allie l'expertise et les capacités cognitives des opérateurs aux atouts des robots : force, vitesse, précision, répétabilité, endurance. De cette façon, elle ouvre des perspectives pour améliorer, d'une part, la qualité, la sécurité, le coût et la productivité des tâches pour les entreprises et, d'autre part, les conditions de travail des opérateurs.

Dans cette thèse nous avons positionné la cobotique comme une discipline nouvelle permettant de concevoir la collaboration homme-robot. Nous avons pour cela eu recours au concept de système cobotique, que nous avons défini comme un système au sein duquel un homme et un robot collaborent pour réaliser une tâche commune dans un environnement donné. Cette collaboration entre l'homme et le robot peut s'exprimer de différentes manières ; nous avons donc dressé une typologie des systèmes cobotiques : téléopération, colocalisation collaborative, comanipulation et exomanipulation.

Pour aborder le thème transdisciplinaires qu'est la cobotique, nous avons réuni des compétences en robotique, en ergonomie, en cognitive et en ingénierie. Nous avons fait émerger de cette réunion une approche interdisciplinaire de conception des systèmes cobotiques que nous avons présentée dans cette thèse. L'expertise des opérateurs étant au cœur du fonctionnement des systèmes cobotiques, nous avons montré l'importance des phases d'analyse de l'activité de travail des opérateurs et de simulation participative pour intégrer les opérateurs dans la conception. Pour guider la conception de la partie robotique, nous avons proposé un modèle de l'architecture et du fonctionnement des systèmes robots pour l'industrie.

1. Une idée popularisée exprime que les robots devraient remplacer l'homme sur des tâches correspondant à l'un des "trois Ds" : "dirty", "dangerous" et "dull" (que l'on peut traduire par "sales", "dangereuses" et "sans intérêt" en français).

Cette approche méthodologique, a une visée opérationnelle pour Safran et ArianeGroup. Elle a été confrontée à plusieurs applications industrielles au cours de son développement. Le projet principal que nous avons mené est celui du nettoyage des cuves de propergol d'ArianeGroup. En Guyane, les différents constituants du propergol – produit de propulsion des fusées Ariane – sont malaxés dans ces cuves avant d'être coulés dans les boosters. Le nettoyage des résidus de propergol présents dans les cuves est une opération difficile physiquement et pyrotechnique, actuellement réalisée manuellement par les opérateurs. Plusieurs tentatives d'amélioration et d'automatisation de ce poste de travail ont échoué dans le passé.

Au travers de notre approche méthodologique, nous avons explicité l'expertise des opérateurs pour réguler les variabilités industrielles du nettoyage et celles liées au propergol. Nous nous sommes appuyé sur ces analyses pour développer un système cobotique afin de répondre au besoin d'amélioration de ce poste, tout en intégrant la marge de manœuvre nécessaire aux opérateurs pour faire face aux variabilités des situations de travail. Pour répondre aux enjeux de sécurité liés au caractère pyrotechnique de ces opérations, nous nous sommes orientés vers un système cobotique de type téléopération. Dans ce document nous avons présenté l'évolution de cette conception avec différentes itérations de simulations participatives. En particulier, un prototype a été réalisé pour évaluer le système en fonctionnement avec les opérateurs, sur une échelle réduite. Il nous a permis de confirmer la pertinence de notre solution et d'orienter les spécifications pour le système final.

Nous avons alors entamé les phases d'industrialisation pour adapter le système cobotique de nettoyage des cuves aux conditions de Guyane et aux contraintes de production pour les fusées Ariane 5 et 6. Une nouvelle étape de simulation participative en réalité virtuelle a été réalisée pour évaluer les choix de conception et l'implantation du système à l'échelle 1, dans le jumeau numérique de l'atelier de Guyane. Nous sommes allés jusqu'au chiffrage de la solution que nous avons proposée. Ces résultats permettront au site de production de Guyane de décider s'ils souhaitent investir dans la réalisation du système final pour sa mise en production.

Les nombreuses communications que nous avons réalisées sur le potentiel de la cobotique et sur notre démarche de conception ont permis de faire émerger un nombre croissant de sujets cobotiques au sein de Safran et d'ArianeGroup. Nous avons ainsi pu appliquer notre approche et les concepts que nous avons développés sur une grande variété d'applications industrielles. Dans cette thèse nous avons présenté deux autres projets : la finition des chargements de propergol et la manutention des armatures.

Pour le projet de finition des chargements de propergol, nous avons évalué le transfert de notre approche à d'autres parties prenantes en impliquant des stagiaires que nous avons formés. Suite à l'application de notre démarche au projet sur des phases de quatre à six mois, ils nous en ont fait un retour critique. Cela nous a permis de faire évoluer l'approche en proposant des formalisations et des concepts pour faciliter son appropriation et son application, à savoir :

- le modèle de l'homme au travail (figure 2.9, page 32) et la classification des déterminants de l'activité (figure 2.22, page 57) ;
- la formalisation de l'activité des opérateurs et de ses déterminants par sous-tâche (figure 3.9, page 72) ;
- l'utilisation de cette formalisation pour élaborer des hypothèses de conception (figure 4.3, page 80) ;
- les simulations participatives de l'activité homme-robot en s'appuyant sur l'élaboration de scénarios et sur des outils de simulation (illustrées dans les sections 4.1.3, 4.2, 4.3.3, 4.3.4 et 4.4.3) ;
- les modèles des systèmes cobotiques (figure 2.15, page 42) et des systèmes robots (figure 2.8, page 28) pour guider l'élaboration des hypothèses de conception et des modèles de simulation sur le système cobotique et sur le système robot respectivement.

Pour le projet de manutention des armatures nous avons illustré l'application du modèle de système cobotique pour une solution de type comanipulation. Nous avons commencé à travailler sur d'autres projets cobotiques pour lesquels nous envisageons des solutions de type comanipulation et colocalisation collaborative. Nous n'avons pas encore étudié de système cobotique de type exomanipulation du

fait de la maturité encore faible des exosquelettes pour l'industrie et de la méconnaissance des effets à long terme sur la santé des opérateurs.

Nous avons ainsi, depuis 3 ans, étudié et mis en œuvre la cobotique au sein de Safran et d'ArianeGroup avec Théo Moulières-Seban, et avec le support de notre double direction de thèse en robotique et en cognitive. La complémentarité de nos compétences et de nos points de vue a permis d'aborder la cobotique de manière globale et a montré son efficacité. Nous avons été embauchés en 2017 au sein d'ArianeGroup pour pérenniser le développement de la cobotique, qui est considérée comme un domaine d'avenir dans la stratégie de la société pour faire face à la concurrence mondiale émergente dans le domaine des lanceurs spatiaux.

Nos communications sur les nouvelles perspectives d'amélioration des postes de travail offertes par la cobotique ont porté leurs fruits. Nous avons constaté que la cobotique, qui était initialement inconnue pour la plupart des personnes que nous rencontrions, est entrée dans le langage courant chez ArianeGroup. Désormais, de nombreux chefs de projet se posent la question de ce que peut offrir la cobotique pour leurs besoins et se tournent vers nous pour chercher des solutions nouvelles.

Au sein d'ArianeGroup près de 40 sujets potentiels ont d'ores et déjà été identifiés et plus de 120 dans le groupe Safran. Pour un grand nombre d'entre eux, une solution est recherchée pour une mise en production dans les deux années à venir. Cela pose la question du déploiement à grande échelle de l'approche de conception des systèmes cobotiques que nous avons proposée dans cette thèse. Aujourd'hui, avec Théo Moulières-Seban, nous centralisons l'étude des sujets cobotiques chez ArianeGroup à travers notre démarche méthodologique. Nous sommes impliqués dans les différents projets avec un positionnement qui va du conseil jusqu'à la conduite du projet.

Pour permettre l'étude d'un plus grand nombre de sujets, une perspective que nous envisageons est la formation de nouvelles personnes à notre approche. Cette formation pourra prendre la forme de sensibilisations au sein de Safran et d'ArianeGroup, comme nous avons commencé à le faire au cours de notre thèse, mais également de collaborations avec le milieu académique pour introduire la cobotique et promouvoir une approche interdisciplinaire de conception des systèmes cobotiques auprès des futurs ingénieurs².

Nous avons montré dans cette thèse que la cobotique a une place forte aux côtés des autres sujets de l'usine du futur pour révolutionner les moyens de production. Avec le déploiement dans l'industrie des autres innovations telles que l'internet des objets et l'intelligence artificielle, la cobotique de demain pourra permettre des collaborations plus naturelles entre les hommes et les robots pour rendre les usines plus performantes et adaptables rapidement aux demandes de leurs clients. Ces évolutions futures devront être accompagnées d'un point de vue technique, humain et éthique pour veiller à ce qu'elles correspondent aux besoins réels des entreprises sans dégrader les conditions de travail des opérateurs.

Nous espérons que l'approche de conception des systèmes cobotiques que nous avons proposée contribuera à la réussite de cette transformation de l'industrie, pour que les nouvelles technologies bénéficient aussi bien aux entreprises qu'aux opérateurs.

2. Depuis 2012, une spécialisation interdisciplinaire "Robotique et apprentissage", commune entre l'École nationale supérieure d'électronique, informatique, télécommunications, mathématique et mécanique de Bordeaux (ENSEIRB-MATMECA) et l'ENSC, réunit les cursus d'ingénieurs en cognitive et en informatique. Cette formation rassemble des compétences variées pouvant aborder les enjeux transdisciplinaires de la cobotique.

Productions scientifiques et techniques

Publications et communications avec actes

- **International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2016)**. Orlando, FL, USA – Communication orale, publication dans les actes – *Human Factors Issues for the Design of a Cobotic System*. Théo Moulières-Seban, David Bitonneau, Jean-Marc Salotti, Jean-François Thibault et Bernard Claverie.
- **Ergo'IA (2016)**. Bidart, France – Communication orale, publication dans les actes – *Les interactions homme-robot pour la cobotique industrielle*. Théo Moulières-Seban, David Bitonneau, Jean-François Thibault, Jean-Marc Salotti et Bernard Claverie.
- **51^{ème} Congrès de la Société d'ergonomie de langue française (SELF 2016)**. Marseille, France – Communication orale, publication dans les actes – *La Cobotique : un domaine pluridisciplinaire émergent utile à l'ergonome*. Théo Moulières-Seban, David Bitonneau, Jean-François Thibault, Jean-Marc Salotti et Bernard Claverie.
- **Congrès de la Federation of European Ergonomics Societies (FEES 2017)**. Pologne – Communication orale, publication dans les actes – *Simulation for Designing Industrial Cobotic Systems*. Théo Moulières-Seban, David Bitonneau, Jean-Marc Salotti, Jean-François Thibault et Bernard Claverie.
- **IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2017)**. Taipei, Taiwan – Communication orale, publication dans les actes – *Design of an Industrial Human-Robot System Through Participative Simulations – Tank Cleaning Case Study*. David Bitonneau, Théo Moulières-Seban, Julie Dumora, Olivier Ly, Jean-François Thibault, Jean-Marc Salotti et Bernard Claverie.
- **Space Propulsion (SP 2018)**. Séville, Espagne – Communication orale, publication dans les actes (accepté) – *Designing Human Robot Collaboration for the Space Factories of the Future*. Théo Moulières-Seban, David Bitonneau, Jean-François Thibault et Bernard Claverie.

Communications et conférences

- **Journées nationales de la robotique interactive**. GDR Robotique (2014). Cité de l'Espace, Toulouse, France – Communication orale – *Conception centrée humain de systèmes cobotiques industriels*. David Bitonneau et Théo Moulières-Seban.
- **Towards a framework for joint action**. Workshop de l'International Conference on Social Robotics (HRI/ICSR 2015). Paris, France – Poster et table ronde – *Classification of Cobotic Systems for Industrial Applications*. David Bitonneau et Théo Moulières-Seban.
- **Journée de l'École doctorale des Sciences physiques et de l'ingénieur (ED SPI 2016)**, Talence, France – Communication orale – *Conception de systèmes cobotiques industriels – Approche robotique avec prise en compte des facteurs humains*. David Bitonneau.

- **Innovation technologique, changements organisationnels, quels enjeux pour la prévention ?** Innovorg (2017). Nancy, France – Communication orale – *La cobotique : de nouveaux outils d'aide à la production et à la prévention*. Théo Moulières-Seban, David Bitonneau, Jean-François Thibault.
- **Colloque GT5 Robotique interactive** GDR Robotique (2017). Université Pierre et Marie Curie, Paris – Communication orale – *Conception d'un système cobotique industriel à travers une approche participative*. David Bitonneau et Théo Moulières-Seban.
- **Ergonomie et les robots collaboratifs** Journée nationale de l'association belge d'ergonomie (BES 2018). Bruxelles, Belgique – Communication orale – *Conception de systèmes cobotiques industriels – Application chez ArianeGroup*. David Bitonneau et Théo Moulières-Seban.
- **53^{ème} Congrès de la société d'ergonomie de langue française** (SELF 2018). Bordeaux, France – Coordination et communication orale – *Symposium "Approches interdisciplinaires de conception de systèmes cobotiques industriels"*. Théo Moulières-Seban, David Bitonneau et Jean-François Thibault.

Participations

Événements

- Salon Innorobo, 2014, Lyon.
- Séminaire "Défis de la collaboration homme-robot" Mines ParisTech, 2015, Paris.
- Journée des jeunes chercheurs en robotique (JJCR 2015), Amiens.
- Journées nationales de la recherche en robotique (JNRR 2015), Cap Hornu.
- Colloque de la chaire industrielle régionale STAH (Systèmes technologiques pour l'augmentation de l'humain), 2016, ENSC, Talence.
- Rencontre "Des robots et des hommes, vers quels modes de coopération ?", Cycle de rencontres objectif ESOF 2018, 2017, Toulouse.
- Journée cobotique du Domaine d'activité Stratégique sur les Interactions homme-robot (DAS IHS) du pôle Aerospace Valley, 2017, Agen.
- Tech Day "Robotique 4.0 – Robotique ouverte, sécurisée, collaborative et innovante", 2017, Poitiers.
- Colloque de l'ENSC sur l'intelligence artificielle, 2017, Talence.

Visites de sites industriels et technologiques

- Plateforme du CEA Tech, 2015, Saclay.
- Plateforme robotique de PSA, 2016, Vélizy.
- Usine du constructeur d'axes linéaires robotiques Lucas France, 2014 et 2017, Bazas.
- Sites d'ArianeGroup (Saint-Médard-en-Jalles, Le Haillan et Issac. fréquemment, Les Mureaux 2017, Vernon 2017, Toulouse 2018).
- Sites industriels Safran :
 - Safran Nacelles (Toulouse 2014).
 - Safran Reosc (Saint-Pierre-du-Perray 2016).
 - Safran Group (plateforme technologique Safran Tech à Paris-Saclay 2016).
 - Safran Aircraft Engines (Gennevilliers 2015, et Corbeil 2016 et 2017).
 - Safran Electronics and Defense (Massy 2016, et Montluçon 2017).
 - Safran Helicopter (Buchelay 2017).

Encadrement d'étudiants

- Proposition, suivi et évaluation d'un projet de fin d'étude à l'ENSC "Simulation et cobotique" (2015).
- Participation à la journée de la robotique à l'ENSEIRB-MATMECA (2016).
- Encadrement de 3 stagiaires ingénieurs chez ArianeGroup (2016 et 2017).

Notes techniques et communications internes ArianeGroup et Safran

Les éléments recensés ici ont été le fruit d'un travail d'équipe avec David Bitonneau, doctorant roboticien, et nos collègues d'ArianeGroup et de Safran.

Notes techniques

2014

- Compte rendu de réunion de lancement du projet Cobotique (Bitonneau et Moulières-Seban).
- Observation de robots à Roxel (Bitonneau et Moulières-Seban).
- Définition des paramètres des essais d'hydrogommage pour le nettoyage de cuves de propergol 420 G (Moulières-Seban et Bitonneau).
- Réunion planification essais hydrogommage (Bitonneau et Moulières-Seban).
- Analyse des risques du projet cobotique (Moulières-Seban et Bitonneau).
- Mise à jour Analyse des risques projet cobotique Herakles (Moulières-Seban et Bitonneau).
- Organisation des essais hydrogommage sur cuve 420 G avec inerte (Bitonneau et Moulières-Seban).
- Mesure de pégosité et viscosité de propergol pour les essais d'hydrogommage (Bitonneau et Moulières-Seban).
- Mesure de pégosité et viscosité d'inerte pour les essais d'hydrogommage (Moulières-Seban et Bitonneau).
- Analyse fonctionnelle du poste de nettoyage des cuves 420 G (Moulières-Seban et Bitonneau).
- Hydrogommage – Essai de filtration des eaux – Compte rendu (Moulières-Seban et Bitonneau).
- Mode opératoire pour essai complémentaire nettoyage de cuve avec inerte par hydrogommage (Bitonneau et Moulières-Seban).

2015

- Réunion de lancement d'un nouveau sujet cobotique : le démoulage des blocs de contrôle (Moulières-Seban et Bitonneau).
- Améliorations du poste de nettoyage des cuves 420 G (Bitonneau et Moulières-Seban).
- Compte rendu de l'essai complémentaire nettoyage de cuve 420 G avec inerte, par hydrogommage (Bitonneau et Moulières-Seban).
- Mesure de pégosité et viscosité dynamique de propergol suivant la température et la durée de réticulation (Bitonneau et Moulières-Seban).
- Retour d'expérience du cobot à SNECMA Genevilliers (Moulières-Seban et Bitonneau).
- Retour sur les offres répondant au CDC du nettoyage des cuves de propergol 420 G (Moulières-Seban et Bitonneau).
- Réalisation d'un démonstrateur pour le nettoyage de cuve - Expression du besoin (Moulières-Seban et Bitonneau).
- Formalisation de l'analyse du poste de démoulage des petits blocs (Moulières-Seban et Bitonneau).

2016

- Retour d'expérience sur la machine nettoyage cuve 1800 G UPG (Bitonneau et Moulières-Seban).
- Analyse des réponses au cahier des charges du prototype (Moulières-Seban et Bitonneau).
- Aspects sécurité de l'observation du retrait des voiles par des caméras (Bitonneau et Moulières-Seban).
- ROI d'amélioration du nettoyage de cuve 1800 G à UPG (Bitonneau et Moulières-Seban).
- Compte-rendu de la mission d'observation du poste de nettoyage des cuves à UPG (Moulières-Seban et Bitonneau).
- Compte-rendu de la journée de la robotique collaborative industrielle (Bitonneau et Moulières-Seban).
- ADR du prototype cobotique nettoyage des cuves (Moulières-Seban et Bitonneau).
- Couplage du dispositif haptique à une simulation robotique (Bitonneau et Moulières-Seban).
- Retour d'expérience sur le poste de nettoyage de cuve de lieur/liant chez Roxel (Bitonneau et Moulières-Seban).

2017

- État de l'art des dispositifs de contrôle haptiques pour le pilotage à distance d'un robot (Moulières-Seban et Bitonneau).
- Rapport de test utilisateur sur le pilotage à distance d'un robot pour le nettoyage des cuves (Moulières-Seban et Bitonneau).
- Intégration d'un dispositif haptique pour le prototype de nettoyage téléopéré des cuves (Bitonneau et Moulières-Seban).
- Les indicateurs de maturité humaine et technologique (Moulières-Seban et Bitonneau).
- Prototype de nettoyage des cuves – Hypothèses et dispositif d'expérience (Bitonneau et Moulières-Seban).
- Prototype de nettoyage des cuves – Essais de raclage automatique (robotique) sur inerte (Bitonneau et Moulières-Seban).
- A6 – Cobotic system for tank cleaning – Conclusions of the prototype and next steps (Moulières-Seban et Bitonneau).

Communications au sein d'ArianeGroup

- Animation du comité de pilotage "cobotique" (semestriel) :
 - pilotage des réunions (ordre du jour, compte rendu, etc.) ;
 - présentations de l'approche méthodologique et des projets en cours.
- Participation au comité de pilotage "ergonomie" (annuel) :
 - participations aux réunions semestrielles ;
 - présentation des projets cobotiques en 2015.
- Présentation du projet nettoyage des cuves :
 - comité exécutif de Safran Herakles – 2014 ;
 - Regulus, exploitant le site de fabrication de propergol de Kourou – 2016.
- Présentation de la démarche :
 - Journée R&T – 2015 ;
 - Conférence de Recherche du Bouchet – 2017 ;
 - Conférence du Savoir – 2017.
- Partage d'expérience avec des équipes ayant des domaines d'activité voisins :
 - facteurs humains pour la qualité ;
 - équipe industrialisation ;
 - équipe chargée de la recherche et technologie sur la réalité virtuelle ;
 - concepteur d'installations critiques.

Communications au sein de Safran

- Participation active au comité de pilotage "cobotique" (semestriel) :
 - présentations de l'approche méthodologique et des projets en cours ;
 - partage d'expérience avec Safran Aircraft Engines et Safran Nacelles, à propos des nouveaux moyens de production ;
 - partage d'expérience avec Safran Electronic and Defense, en particulier à propos des exosquelettes.
- Rédaction, conception d'outil, et animation du réseau d'entreprise sur la cobotique.
- Participation au Copil Ergonomie : présentations de l'approche méthodologique et des projets en cours (2015 et 2016).
- Participation au Comité Robotique Groupe :
 - présentations de l'approche méthodologique et des projets en cours (2015 et 2016) ;
 - participation aux réunions mensuelles en visioconférence.
 - participation aux séminaires annuels sur un site de Safran.

Glossaire

Acceptabilité propension d'un dispositif technique à être accepté par ses utilisateurs.

Ambiance physique les ambiances physiques sont des facteurs environnementaux pouvant avoir un impact sur le travail humain, tels que le bruit, les vibrations, l'éclairage, la chaleur, le froid, l'hygrométrie ou l'atmosphère.

Autonomie capacité à s'autogouverner, à mettre en œuvre des régulations, face à des situations nouvelles pour atteindre des objectifs haut niveau sans aide extérieure [Cha14].

Bras haptique (aussi appelé "bras maître à retour d'effort") dispositif de commande à retour d'effort permettant à un opérateur de contrôler un robot manipulateur en position et en effort.

Cobot robot conçu pour interagir physiquement avec l'homme de manière sécurisée, et pour guider son geste à l'aide de surfaces et guides virtuels programmables.

Cobotique discipline émergente qui s'intéresse à l'interaction, directe ou téléopérée, entre opérateur(s) humain(s) et système(s) robot pour atteindre un objectif commun, c'est-à-dire à la collaboration homme-robot [CLF13].

Cognitique science du traitement de la connaissance, que celle-ci soit humaine ou informatisée.

Collaboration travail de plusieurs agents dans la réalisation d'une tâche commune [Ter95].

Colocalisation collaborative collaboration homme-robot dans le même espace de travail sans interaction physique directe.

Comanipulation interaction physique homme-robot dans le même espace de travail pour réaliser une tâche.

Contrôle supervisé en contrôle supervisé, l'homme supervise la réalisation des actions du robot distant, ayant des comportements autonomes, et peut intervenir si nécessaire.

Dispositif de commande dispositif physique permettant à un opérateur d'envoyer des commandes à un système robot (par exemple un clavier, un pendant d'apprentissage, un joystick ou un bras haptique).

Ergol substance employée, seule ou en association avec d'autres substances, pour fournir de l'énergie [Gro93].

Ergonomie science qui s'intéresse à l'homme en activité dans son environnement de travail. La finalité première de cette discipline est de transformer le travail pour que l'activité des opérateurs n'altèrent pas leur santé, et ce en atteignant les objectifs économiques de l'entreprise [GLD⁺91].

Exomanipulation collaboration homme-robot pour laquelle le robot est revêtu par l'homme. Les dispositifs d'exomanipulation sont appelés "exosquelettes".

Inerte qualifie tout composant, élément ou substance non pyrotechnique.

Jacobienne la matrice jacobienne donne la transformation mathématique des vitesses exprimées dans l'espace articulaire du robot, en vitesse exprimée dans l'espace cartésien des opérations.

Pendant d'apprentissage élément tenu à la main et relié au système de commande, avec lequel un robot peut être programmé ou déplacé (ISO 8373:2012).

Propergol produit comprenant un ou des ergols, pour former un mélange ou un composé apte à fournir de l'énergie de propulsion lors de sa combustion [Gro93]. Ce produit est notamment utilisé pour la propulsion des fusées.

Pégosité caractère collant d'un matériau.

Risque pyrotechnique risque présenté par les matières ou objets explosifs lors de leur décomposition fonctionnelle ou accidentelle [Gro93].

Robot collaboratif robot conçu pour pouvoir interagir physiquement avec l'homme de manière sécurisée, en respectant les exigences de la norme ISO 10218:2011.

Robotique discipline qui s'intéresse à la conception, la réalisation, l'évaluation et l'utilisation des robots.

Simulation participative simulation faisant intervenir les utilisateurs finaux (dans notre cadre, les opérateurs) dans l'étude d'un système modélisé. Les opérateurs participant aux simulations peuvent ainsi donner leur avis sur la conception, et l'alimenter avec leur expertise et leurs besoins réels au poste de travail.

Système cobotique système au sein duquel homme et robot interagissent pour satisfaire un objectif commun.

Tâche réalisation d'un procédé pour atteindre des objectifs.

Téléopération en téléopération, l'homme contrôle directement les mouvements du robot distant, à l'aide d'un joystick ou d'un bras haptique par exemple.

Usine du futur le concept d'usine du futur (aussi qualifié d'usine 4.0) correspond à la 4^e révolution industrielle après la mécanisation, la production de masse avec l'électrification des lignes industrielles, et l'automatisation avec les ordinateurs et les robots. Elle vise à rendre les usines plus flexibles aux changements de production pour fabriquer des produits personnalisés aux désirs des consommateurs, sur des faibles volumes de fabrication. L'usine du futur s'appuie sur l'émergence de nouvelles technologies telles que l'internet des objets – où de plus en plus d'objets et de systèmes sont connectés via internet –, le big data, l'intelligence artificielle ou encore les robots collaboratifs. La cobotique est ainsi une des clés de l'usine du futur.

Acronymes et sigles

AFNOR Association française de normalisation.

AGV Automated Guided Vehicle (véhicule à guidage automatique).

API Application Programming Interface (interface de programmation applicative).

ATEX atmosphère explosible.

CAO conception assistée par ordinateur.

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

Cetim Centre technique des industries mécaniques.

CHSCT Comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail.

Cifre Conventions industrielles de formation par la recherche.

CIH Cognitive et ingénierie humaine.

DDL degré de liberté.

DGE Direction générale des entreprises.

ENSC École nationale supérieure de cognitive.

ENSEIRB-MATMECA École nationale supérieure d'électronique, informatique, télécommunications, mathématique et mécanique de Bordeaux.

EPI équipements de protection individuelle.

EST étude de sécurité au travail.

FAO fabrication assistée par ordinateur.

IFR International Federation of Robotics (Fédération internationale de robotique).

IHM interface homme-machine.

IHR interactions homme-robot.

IMS Intégration du matériau au système.

ISO International Organization for Standardization (Organisation internationale de normalisation).

LaBRI Laboratoire bordelais de recherche en informatique.

MGD modèle géométrique direct.

MV mécanisme virtuel.

PHL programmation hors-ligne.

ROI Return On Investment (retour sur investissement).

ROS Robot Operating System (système d'exploitation pour robot).

SCARA Selective Compliance Assembly Robot Arm (robot manipulateur polyvalent pour l'assemblage).

SSE santé, sécurité et environnement.

Symop Syndicat des entreprises et technologies de production.

TAO téléopération assistée par ordinateur.

Bibliographie

- [AASB⁺06] Rachid ALAMI, Alin ALBU-SCHAEFFER, Antonio BICCHI, Rainer BISCHOFF, Raja CHATILA, Andrea DE LUCA, Agostino DE SANTIS, G. GIRALT, Jérémie GUIOCHET, G. HIRZINGER, François Felix INGRAND, Vincenzo LIPPIELLO, R. MATTONE, David POWELL, Soumen SEN, Bruno SICILIANO, G. TONIETTI et Luigi VILLANI : Safe and dependable physical human-robot interaction in anthropic domains : State of the art and challenges. *In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006.
- [Aco13] Sylvain ACOULON : Les robots collaboratifs – Guide d’intégration de la santé et de la sécurité. Rapport technique, Centre technique des industries mécaniques (Cetim), 2013.
- [AFN09] AFNOR : NF EN 614-1+A1 Sécurité des machines – Principes ergonomiques de conception – Partie 1 : terminologie et principes généraux, 2009.
- [AFN11a] AFNOR : NF EN ISO 10218-1 Robots et dispositifs robotiques – Exigences de sécurité pour les robots industriels – Partie 1 : Robots, 2011.
- [AFN11b] AFNOR : NF EN ISO 10218-2 Robots et dispositifs robotiques – Exigences de sécurité pour les robots industriels – Partie 2 : Systèmes robots et intégration, 2011.
- [AFN12] AFNOR : NF EN ISO 8373 Robots et composants robotiques – Vocabulaire, 2012.
- [AP08] Jorge ANGELES et Frank C PARK : Performance Evaluation and Design Criteria. *In* Bruno SICILIANO et Oussama KHATIB, éditeurs : *Springer Handbook of Robotics*, pages 229–244. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [APC⁺99] Prasad AKELLA, Michael A. PESHKIN, James Edward COLGATE, Witaya WANNASUPHOPRASIT, Nidamaluri NAGESH, Jim WELLS, Steve HOLLAND, Tom PEARSON et Brian PEACOCK : Cobots for the automobile assembly line. *In International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, pages 728–733, Detroit, Michigan, 1999. IEEE.
- [Bai83] Lianne BAINBRIDGE : Ironies of Automation. *Automatica*, 19, 1983.
- [BFG⁺97] R. Peter BONASSO, R. James FIRBY, Erann GAT, David KORTENKAMP, David P. MILLER et Marc G. SLACK : Experiences with an Architecture for Intelligent, Reactive Agents. *Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 9(2/3):237–256, 1997.
- [Bon84] Géraldine De BONNAFOS : Automatisation et nouvelles formes d’organisation du travail dans l’industrie automobile. *Formation Emploi*, 8(1):5–14, 1984.
- [BS09] Luis BASAÑEZ et Raúl SUÁREZ : Teleoperation. *In* Shimon Y. NOF, éditeur : *Springer Handbook of Automation*, pages 449–468. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [BVD14] Flore BARCELLINI, Laurent VAN BELLEGHEM et François DANIELLOU : Design projects as opportunities for the development of activities. *In* Pierre FALZON, éditeur : *Constructive Ergonomics*, pages 150–163. CRC Press, 2014.
- [CFH08] Wankyun CHUNG, Li-Chen FU et Su-Hau HSU : Motion Control. *In* Bruno SICILIANO et Oussama KHATIB, éditeurs : *Springer Handbook of Robotics*, pages 133–159. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [CH08] Henrik I. CHRISTENSEN et Gregory D. HAGER : Sensing and Estimation. *In* Bruno SICILIANO et Oussama KHATIB, éditeurs : *Springer Handbook of Robotics*, pages 87–107. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

- [Cha14] Raja CHATILA : Robotique et simplicité : modèles, architecture, décision et conscience. In Alain BERTHOZ et Jean-luc PETIT, éditeurs : *Complexité-Simplicité*, chapitre 15. Collège de France, Paris, 2014.
- [Cla05] Bernard CLAVERIE : *Cognitive : Science et pratique des relations à la machine à penser*. L'Harmattan, 2005.
- [Cla10] Bernard CLAVERIE : Pluri-, inter-, transdisciplinarité : ou le réel décomposé en réseaux de savoir. *Revue internationale de Projectique*, 1(4):5–27, 2010.
- [CLF13] Bernard CLAVERIE, Benoît LE BLANC et Pascal FOUILLAT : La cobotique : la robotique soumise. *Communication et organisation*, 44:203 – 214, 2013.
- [Coi07] Philippe COIFFET : Robots industriels : concepts, définitions et classifications. *Techniques de l'Ingénieur*, 2007.
- [Com14] COMMISSION DE RÉFLEXION SUR L'ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DU NUMÉRIQUE D'ALLISTENE (CERNA) : Éthique de la recherche en robotique. Rapport technique, Alliance des sciences et technologies du numérique (Allistene), 2014.
- [Com17] COMMISSION MONDIALE D'ÉTHIQUE DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES ET DES TECHNOLOGIES (COMEST) : Rapport de la COMEST sur l'éthique de la robotique. Rapport technique, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO), Paris, 2017.
- [COW08] Stefano CHIAVERINI, Giuseppe ORIOLO et Ian D WALKER : Kinematically Redundant Manipulators. In *Springer Handbook of Robotics*, pages 245–268. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [CPC⁺16] Andrea CHERUBINI, Robin PASSAMA, André CROSNIER, Antoine LASNIER et Philippe FRAISSE : Collaborative manufacturing with physical human-robot interaction. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 40:1–13, 2016.
- [CWP96] James Edward COLGATE, Witaya WANNASUPHOPRASIT et Michael A. PESHKIN : Cobots : Robots for Collaboration With Human Operators. In *International Mechanical Engineering Congress and Exhibition*, volume 58, pages 433–439, Atlanta, GA, 1996.
- [Dan04] François DANIELLOU : L'ergonomie dans la conduite de projets de conception de systèmes de travail. In Pierre FALZON, éditeur : *Ergonomie*, pages 359–373. Presses Universitaires de France, Paris, 2004.
- [Dan07] François DANIELLOU : Des fonctions de la simulation des situations de travail en ergonomie. *Activités*, 4(2):77–83, 2007.
- [Dev12] Michel DEVY : La cobotique : des robots industriels aux robots assistants, coopérants et co-opérateurs. *Annales des Mines - Réalités industrielles*, 2012(1):76–85, 2012.
- [Dir16] DIRECTION GÉNÉRALE DES ENTREPRISES (DGE) : Technologies clés 2020 – Préparer l'industrie du futur. Rapport technique, Ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique, 2016.
- [DK99] Michael P. DEISENROTH et Krishna K. KRISHNAN : On-line Programming. In Shimon Y. NOF, éditeur : *Handbook of Industrial Robotics*, pages 337–351. John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [DW02] Sidney W. A. DEKKER et David D. WOODS : MABA-MABA or Abracadabra ? Progress on Human-Automation Co-ordination. *Cognition, Technology & Work*, 4(4):240–244, 2002.
- [DXLZ10] Sanpeng DENG, Xiaoli XU, Chongning LI et Xinghui ZHANG : Research on the oil tank sludge cleaning robot system. In *International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, pages 5938–5942, 2010.
- [EHF09] Norbert ELKMANN, Justus HORTIG et Markus FRITZSCHE : Cleaning Automation. In Shimon Y. NOF, éditeur : *Springer Handbook of Automation*, pages 1253–1264. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

- [End95] Mica R. ENDSLEY : Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1):32–64, 1995.
- [End15] Mica R. ENDSLEY : *Autonomous Horizons : System Autonomy in the Air Force – A Path to the Future. Volume I : Human-Autonomy Teaming*. United States Air Force, 2015.
- [Eur84] EUROFOUND : L’impact des technologies nouvelles sur le travail posté dans l’industrie automobile. Rapport technique, Fondation européenne pour l’amélioration des conditions de vie et de Travail, 1984.
- [Fed15] FEDERATION DES INDUSTRIES MECANIQUES (FIM) : Guide pratique de l’usine du futur – Enjeux et panorama de solutions. Rapport technique, Alliance industrie du futur, 2015.
- [Fit51] Paul M. FITTS, éditeur. *Human Engineering for an Effective Air Navigation and Traffic Control System*. National Research Council, Washington, 1951.
- [FSNP09] Matthew FIELD, David STIRLING, Fazel NAGHDY et Zengxi PAN : Motion capture in robotics review. *In IEEE International Conference on Control and Automation*, pages 1697–1702, 2009.
- [GA11] Florian GOSSELIN et Claude ANDRIOT : Hardware devices of forceback feedback interfaces. *In Philippe FUCHS, Guillaume MOREAU et Pascal GUITTON, éditeurs : Virtual Reality : Concepts And Technologies*, pages 137–179. Taylor & Francis Group, 2011.
- [GCH⁺01] S. GRANGE, F. CONTI, P. HELMER, P. ROUILLER et C. BAUR : Overview of the delta haptic device. *In Eurohaptics*, Birmingham, Angleterre, 2001.
- [GFL04] Philippe GARREC, Jean-Pierre FRICONNEAU et François LOUVEAU : Virtuouse 6D : A new force-control master arm using innovative ball-screw actuators. *In ISIR 35th International Symposium in Robotics*, Paris, 2004.
- [GLD⁺91] François GUERIN, Antoine LAVILLE, François DANIELLOU, Jacques DURAFFOURG et Alain KERGUELEN : *Comprendre le travail pour le transformer. La pratique de l’ergonomie*. Anact, 1991.
- [GMG⁺10] Philippe GARREC, Yvan MEASSON, Rodolphe GELIN, Jean-Pierre FRICONNEAU, Philippe DESBATS et Alain RIWAN : Téléopération : les applications en zone contrôlée. *Techniques de l’Ingénieur*, 2010.
- [GMH⁺13] Brian GLEESON, Karon MACLEAN, Amir HADDADI, Elizabeth CROFT et Javier ALCAZAR : Gestures for Industry : Intuitive Human-Robot Communication from Human Observation. *In ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pages 349–356, 2013.
- [GR01] F. GOSSELIN et A. RIWAN : Design of VIRTUOSE 3D : A new haptic interface for teleoperation and virtual reality. *In 10th International Conference on Advanced Robotics*, pages 205–212, Budapest, Hongrie, 2001.
- [GRDM10] Philippe GARREC, Alain RIWAN, Olivier DAVID et Yvan MEASSON : Téléopération – Principes et technologies. *Techniques de l’Ingénieur*, 2010.
- [GRMA10] Franck GEFFARD, François-Xavier RUSSOTTO, Yvan MEASSON et Claude ANDRIOT : Téléopération. Contrôle commande. *Techniques de l’Ingénieur*, 2010.
- [Gro93] GROUPE DE TRAVAIL DE PYROTECHNIE : *Dictionnaire de pyrotechnie*. Association Française de Pyrotechnie, 4e édition, 1993.
- [Gro96] Barbara J. GROSZ : Collaborative Systems. *American Association for Artificial Intelligence Magazine*, 17(2):67–85, 1996.
- [GS07] Michael A. GOODRICH et Alan C. SCHULTZ : Human-Robot Interaction : A Survey. *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, 1(3):203–275, 2007.
- [GTJM01] Alain GARRIGOU, Jean-François THIBAUT, Marçal JACKSON et Fausto MASCIA : Contributions et démarche de l’ergonomie dans les processus de conception. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, 3(2), 2001.

- [Had14] Sami HADDADIN : *Towards Safe Robots : Approaching Asimov's 1st Law*. Springer Publishing Company, 2014.
- [Har01] Joe HARRINGTON : *Industrial cleaning technology*. Kluwer Academic Publisher, 2001.
- [Hel90] Martin G. HELANDER : Ergonomics and safety considerations in the design of robotics workplaces : a review and some priorities for research. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 6:127–149, 1990.
- [HJP+13] Peter A. HANCOCK, Richard J. JAGACINSKI, Raja PARASURAMAN, Christopher D. WICKENS, Glenn F. WILSON et David B. KABER : Human-Automation Interaction Research : Past, Present, and Future. *Ergonomics in Design : The Quarterly of Human Factors Applications*, 21(9):9–14, 2013.
- [HNP08] Martin HÄGELE, Klas NILSSON et J Norberto PIRES : Industrial Robotics. In Bruno SICILIANO et Oussama KHATIB, éditeurs : *Springer Handbook of Robotics*, pages 963–986. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [Hoc01] Jean-Michel HOC : Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. *International Journal of Human-Computer Studies*, 54:509–540, 2001.
- [HSH02a] Martin HÄGELE, Walter SCHAAFT et Evert HELMS : Robot Assistants at Manual Workplaces : Effective Co-operation and Safety Aspects. In *33rd International Symposium on Robotics*, 2002.
- [HSH02b] Evert HELMS, Rolf Dieter SCHRAFT et Martin HÄGELE : Rob@work : Robot assistant in industrial environments. In *IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pages 399–404, 2002.
- [IFR97] IFR : World Robotics : Industrial Robots, 1997.
- [IFR15] IFR : World Robotics : Industrial Robots, 2015.
- [IFR16] IFR : World Robotics : Industrial Robots, 2016.
- [IL90] Kaoru ISHIKAWA et John H LOFTUS : *Introduction to Quality Control*. 3A Corporation, Tokyo, 1990.
- [ISO16] ISO : ISO/TS 15066 : Robots and robotic devices – Collaborative robots, 2016.
- [JA95] Luc D. JOLY et Claude ANDRIOT : Imposing motion constraints to a force reflecting telerobot through real-time simulation of a virtual mechanism. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, pages 357–362, 1995.
- [JAH97] Luc D. JOLY, Claude ANDRIOT et Vincent HAYWARD : Mechanical analogies in hybrid position/force control. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, pages 835–840, 1997.
- [KBRS97] David KORTENKAMP, R. Peter BONASSO, Dan RYAN et Debbie SCHRECKENGHOST : Traded control with autonomous robots as mixed initiative interaction. In *AAAI Symposium on Mixed Initiative Interaction*, pages 89–94, 1997.
- [KH04] Nathan KOENIG et Andrew HOWARD : Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 3, pages 2149–2154, 2004.
- [KS08] David KORTENKAMP et Reid SIMMONS : Robotic systems architectures and programming. In Bruno SICILIANO et Oussama KHATIB, éditeurs : *Springer Handbook of Robotics*, pages 187–206. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [Lam16] Alain LAMOUR : Robots collaboratifs : prêts pour le service ! *Cetim infos*, 2016.
- [Law93] Dale A. LAWRENCE : Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(5):624–637, 1993.
- [Lep03] Jacques LEPLAT : La modélisation en ergonomie à travers son histoire. In Jean-Claude SPERANDIO et Marion WOLFF, éditeurs : *Formalismes de modélisation pour l'analyse du travail et l'ergonomie*, pages 1–26. Presses Universitaires de France, 2003.

- [LS04] John D. LEE et Katrina A. SEE : Trust in Automation : Designing for Appropriate Reliance. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 46(1):50–80, 2004.
- [LS09] John D. LEE et Bobbie D. SEPPELT : Human Factors in Automation Design. In Shimon Y. NOF, éditeur : *Springer Handbook of Automation*, chapitre 25, pages 417–436. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [Mak13] Maria MAKAROV : *Contribution à la modélisation et la commande robuste de robots manipulateurs à articulations flexibles. Applications à la robotique interactive*. Thèse de doctorat, 2013.
- [Mal94] Joël MALINE : *Simuler le travail – Une aide à la conduite de projet*. Editions de l’ANACT, Montrouge, 1994.
- [MB94] Guillaume MOREL et Philippe BIDAUD : Experiments on Impedance Control to Derive Adaptive Strategies. In Tsuneo YOSHIKAWA et Fumio MIYAZAKI, éditeurs : *Experimental Robotics III. Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol 200*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994.
- [Mic04] Olivier MICHEL : "WebotsTM : Professional Mobile Robot Simulation". *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 1(1):39–42, 2004.
- [MM13] MINISTÈRE DU REDRESSEMENT PRODUCTIF et MINISTÈRE DE L’ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE : France Robots Initiatives, 2013.
- [MMS⁺14] George MICHALOS, Sotiris MAKRIS, Jason SPILIOPOULOS, Ioannis MISIOS, Panagiota TSAROUCI et George CHRYSOLOURIS : ROBO-PARTNER : Seamless human-robot cooperation for intelligent, flexible and safe operations in the assembly factories of the future. *Procedia CIRP*, 23:71–76, 2014.
- [MP02] Edmond MARC et Dominique PICARD : Interaction. In *Vocabulaire de psychosociologie*, pages 189–196. Erès édition, 2002.
- [MPD⁺16] Anis MEGUENANI, Vincent PADOIS, Jimmy DA SILVA, Antoine HOARAU et Philippe BIDAUD : Energy based control for safe human-robot physical interaction. In *International Symposium on Experimental Robotics*, 2016.
- [MPMB17] Pauline MAURICE, Vincent PADOIS, Yvan MEASSON et Philippe BIDAUD : Human-oriented design of collaborative robots. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 57:88–102, 2017.
- [MQP⁺17] Federico MAGGI, Davide QUARTA, Marcello POGLIANI, Mario POLINO, Andrea M ZANCHETTIN et Stefano ZANERO : Rogue Robots : Testing the Limits of an Industrial Robot’s Security. Rapport technique, Trend Micro, 2017.
- [MS94] Thomas H. MASSIE et J. Kenneth SALISBURY : The PHANToM Haptic Interface : A device for probing virtual objects. In *ASME Winter Annual Meeting*, pages 295–302, Chicago, 1994.
- [MS17] Théo MOULIÈRES-SEBAN : *Conception de systèmes cobotiques industriels – Approche cognitive – Application à la production pyrotechnique au sein d’ArianeGroup*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2017.
- [NAS15] NASA : NASA Technology Roadmaps – TA 4 : Robotics and autonomous systems. Rapport technique, National Aeronautics and Space Administration, 2015.
- [NKS80] Shimon Y. NOF, James L. KNIGHT et Gavriel SALVENDY : Effective Utilization of Industrial Robots – A Job and Skills Analysis Approach. *AIE Transactions*, 12(3):216–225, 1980.
- [NLR15] Stefanos NIKOLAIDIS, Przemyslaw LASOTA, Ramya RAMAKRISHNAN et Julie SHAH : Improved human-robot team performance through cross-training, an approach inspired by human team training practices. *International Journal of Robotics Research*, 34(14):1711–1730, 2015.

- [Nor88] Donald A. NORMAN : *The Design of Everyday Things*. Basic Books, 1988.
- [NPH08] Günter NIEMEYER, Carsten PREUSCHE et Gerd HIRZINGER : Telerobotics. In *Springer Handbook of Robotics*, pages 741–757. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [NRB07] Emmanuel NUÑO, Adolfo RODRÍGUEZ et Luis BASAÑEZ : Force reflecting teleoperation via IPv6 protocol with geometric constraints haptic guidance. In *Advances in Telerobotics, STAR, Vol. 31*, pages 445–458. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [NS13] Stefanos NIKOLAIDIS et Julie SHAH : Human-Robot Cross-Training : Computational Formulation, Modeling and Evaluation of a Human Team Training Strategy. In *8th ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*, pages 33–40, Tokyo, Japan, 2013.
- [PCW⁺01] Michael A. PESHKIN, James Edward COLGATE, Witaya WANNASUPHOPRASIT, Carl A. MOORE, R. Brent GILLESPIE et Prasad AKELLA : Cobot architecture. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17(4):377–390, 2001.
- [PNA⁺16] Mikkel Rath PEDERSEN, Lazaros NALPANTIDIS, Rasmus Skovgaard ANDERSEN, Casper SCHOU, Simon BOGH, Volker KRÜGER et Ole MADSEN : Robot skills for manufacturing : From concept to industrial deployment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37:282–291, 2016.
- [PR97] Raja PARASURAMAN et Victor RILEY : Humans and Automation : Use, Misuse, Disuse, Abuse. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 39(2):230–253, 1997.
- [PSW00] Raja PARASURAMAN, Thomas B. SHERIDAN et Christopher D. WICKENS : A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A : Systems and Humans*, 30(3):286–297, may 2000.
- [PSW08] Raja PARASURAMAN, Thomas B. SHERIDAN et Christopher D. WICKENS : Situation Awareness, Mental Workload, and Trust in Automation : Viable, Empirically Supported Cognitive Engineering Constructs. *Cognitive Engineering and Decision Making*, 2(2):140–160, 2008.
- [RK90] Mansour RAHIMI et Waldemar KARWOWSKI : A Research Paradigm in Human-Robot Interaction. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 5:59–71, 1990.
- [RSF13] Eric ROHMER, Surya P. N. SINGH et Marc FREESE : V-REP : A versatile and scalable robot simulation framework. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1321–1326, 2013.
- [Rub99] Jacob RUBINOVITZ : CAD and Graphics Simulators/Emulators of Robotic Systems. In Shimon Y. NOF, éditeur : *Handbook of Industrial Robotics*, pages 755–772. John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [SBCF14] Nahema SYLLA, Vincent BONNET, Frédéric COLLEDANI et Philippe FRAISSE : Ergonomic contribution of ABLE exoskeleton in automotive industry. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(4):475–481, 2014.
- [Sch03] Jean SCHOLTZ : Theory and evaluation of human robot interactions. In *36th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2003.
- [She92] Thomas B. SHERIDAN : *Telerobotics, automation, and human supervisory control*. MIT Press, 1992.
- [SK13] Amit SHUKLA et Hamad KARKI : A review of robotics in onshore oil-gas industry. In *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pages 1153–1160, 2013.
- [SM08] Victor SCHEINMAN et J. Michael MCCARTHY : Mechanisms and Actuation. In Bruno SICILIANO et Oussama KHATIB, éditeurs : *Springer Handbook of Robotics*, pages 67–86. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [SNS01] Rolf Dieter SCHRAFT, Jens-Günter NEUGEBAUER et Stefan SCHMID : Automation and Robotics. In Gavriel SALVENDY, éditeur : *Handbook of Industrial Engineering : Technology and Operations Management, Third Edition*, pages 354–400. John Wiley & Sons, Inc., 2001.

- [SS79] Thomas B. SHERIDAN et R. W. SIMPSON : Toward the definition and measurement of the mental workload of transport pilots. Rapport technique, MIT Flight Transportation Lab Rep., Cambridge : Massachusetts Institute of Technology, 1979.
- [Sta95] Wolfram STADLER : *Analytical Robotics and Mechatronics*. McGraw-Hill, New York, 1995.
- [SV78] Thomas B. SHERIDAN et William L. VERPLANK : Human and Computer Control of Undersea Teleoperators. Rapport technique, MIT Man-Machine Systems Laboratory, Cambridge, MA, 1978.
- [Sym11] SYMOP : *Robotisation – mode d’emploi*. Techniques édition, 2011.
- [TAS12] Andreas TOBERGTE et Alin ALBU-SCHÄFFER : Direct force reflecting teleoperation with a flexible joint robot. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4280–4287, 2012.
- [Ter95] Loren G. TERVEEN : Overview of human-computer collaboration. *Knowledge-Based Systems*, 8(2):67–81, 1995.
- [Thi98] Jean-François THIBAUT : Instrumenter les simulations. *Performances*, 97:14–22, 1998.
- [Thi17] Jean-François THIBAUT, éditeur. *Guide pratique d’ergonomie en conception industrielle*. OCTARÈS Édition, SAFRAN, 2017.
- [TLL⁺16] Yang TAN, Darwin LAU, Mingxing LIU, Philippe BIDAUD et Vincent PADOIS : Minimization of the rate of change in torques during contact transitions for humanoids. In *European Control Conference*, Aalborg, Denmark, 2016.
- [TSC⁺06] J. Gregory TRAFTON, Alan C. SCHULTZ, Nicholas L. CASSIMATIS, Laura M. HIATT, Dennis PERZANOWSKI, Derek P. BROCK, Magdalena D. BUGAJSKA et William ADAMS : Communicating and Collaborating with Robotic Agents. In R. SUN, éditeur : *Cognition and multi-agent interaction*, pages 252–278. Cambridge University Press, New York, 2006.
- [VD08] Luigi VILLANI et Joris DE SCHUTTER : Force Control. In Bruno SICILIANO et Oussama KHATIB, éditeurs : *Springer Handbook of Robotics*, pages 161–185. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [WAPC98] Witaya WANNASUPHOPRASIT, Prasad AKELLA, Michael PESHKIN et J. Edward COLGATE : Cobots : a novel material handling technology. In *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Anaheim, California USA, 1998.
- [Wil14] John R. WILSON : Fundamentals of systems ergonomics/human factors. *Applied Ergonomics*, 45(1):5–13, 2014.
- [WPF⁺14] Vincent WEISTROFFER, Alexis PALJIC, Philippe FUCHS, Olivier HUGUES, Jean Paul CHODACKI, Pascal LIGOT et Alexandre MORAIS : Assessing the acceptability of human-robot co-presence on assembly lines : A comparison between actual situations and their virtual reality counterparts. In *IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pages 377–384, 2014.
- [WSH⁺99] H.-J. WARNECKE, Rolf Dieter SCHRAFT, Martin HÄGELE, Oliver BARTH et G. SCHMIERER : Manipulator design. In Shimon Y. NOF, éditeur : *Handbook of Industrial Robotics*, pages 43–78. John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [YB99] Y. F. YONG et Maurice C. BONNEY : Off-line Programming. In Shimon Y. NOF, éditeur : *Handbook of Industrial Robotics*, pages 353–371. John Wiley & Sons, Inc., 1999.