



HAL
open science

**Conception de systèmes cobotiques industriels.
Approche cognitive Application à la production
pyrotechnique au sein d'Ariane Group**

Théo Moulières-Seban

► **To cite this version:**

Théo Moulières-Seban. Conception de systèmes cobotiques industriels. Approche cognitive Application à la production pyrotechnique au sein d'Ariane Group. Sciences cognitives. ED SPI 209, 2017. Français. NNT: . tel-01670146

HAL Id: tel-01670146

<https://hal.science/tel-01670146v1>

Submitted on 21 Dec 2017

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 Ingénierie Cognitive

Par Théo Moulières-Seban

**Conception de systèmes cobotiques industriels
Approche cognitive
Application à la production pyrotechnique au sein d'Ariane Group**

Sous la direction de Jean-Marc Salotti et Bernard Claverie

Soutenue le 30 novembre 2017

Membres du jury :

M. GARRIGOU, Alain	Professeur des Universités – Université de Bordeaux	Président du jury
M. CHAUDRON, Laurent	Directeur de recherches – ONERA	Rapporteur
M. PAPEGAY, Yves	Chargé de recherches – INRIA	Rapporteur
M. CARDOT, Hubert	Professeur des Universités – Polytech Tours	Examinateur
M. SALOTTI, Jean-Marc	Professeur des Universités – IMS, ENSC Bordeaux INP	Directeur de thèse
M. CLAVERIE, Bernard	Professeur des Universités – IMS, ENSC Bordeaux INP	Directeur de thèse
M. THIBAUT, Jean-François	Responsable du Programme Ergonomie – Safran Group	Tuteur industriel
M. TRAISSAC, Yves	Directeur du Cluster Propulsion Solide – Ariane Group	Membre invité

*“And I lost my page again.
I know this is surreal,
But, I’ll try my luck with you.
This life is on my side”*
Julian Casablancas

Résumé

Les robots sont très largement utilisés dans l'industrie ; une de leurs limites actuelles est celle de la complexité des tâches que l'on souhaite les voir accomplir. Celles-là ne peuvent être réalisées sans un haut pouvoir d'adaptation, autrement dit aujourd'hui sans la performance et la plasticité de la cognition humaine. La cobotique est récemment apparue comme « le domaine » de la collaboration homme-robot. Elle s'affirme comme perspective pour aider l'homme, l'augmenter, dans la réalisation de tâches complexes pour l'Industrie du Futur.

Pour délimiter notre objet d'étude, nous avons ainsi introduit le concept de « système cobotique ». Ce système comprend l'homme et le robot, qui interagissent et peuvent avoir différents rôles, pour réaliser une tâche commune. La conception des systèmes cobotiques doit évidemment prendre en compte les technologies émergentes, mais elle doit surtout intégrer l'homme, grâce à l'analyse de l'activité, à la formalisation des connaissances, et aux simulations participatives. Pour cela, à l'initiative de Safran Group, cette thèse d'ingénierie cognitive a été réalisée en binôme avec un roboticien également doctorant et membre du groupe industriel : David Bitonneau.

Ensemble, nous avons proposé une approche interdisciplinaire de conception, appelée l'« ingénierie des systèmes cobotiques ». Cette approche méthodologique, validée à la fois par nos encadrants académiques et industriels, a été expérimentée afin de satisfaire un besoin industriel de la société Ariane Group : le nettoyage des cuves. Nous avons conduit ce projet, de l'analyse du besoin jusqu'à la réalisation d'un prototype qui a été évalué par les opérateurs. L'industrialisation du système est en cours de préparation au moment de la rédaction de cette thèse, avec des perspectives de déploiements sur plusieurs sites.

Nous prévoyons que les systèmes cobotiques tels que nous les avons définis, conçus et étudiés, seront une des clés de la compétitivité de l'Industrie du Futur. Elle pourra s'appuyer sur leur flexibilité et leur connectivité à l'écosystème technologique des ateliers 4.0, tout en maintenant la place centrale de l'homme et en considérant celui-là comme acteur premier dans le système.

Abstract

Industrial cobotic system design - Cognitive engineering approach *Practical application to pyrotechnic manufacturing within Ariane Group*

Nowadays, robots are increasingly used in industrial processes. However, there is an upper bound on the tasks' complexity that industrial robots can execute. Some of these hard tasks can only be completed with a high adaptation capacity: the plasticity of human cognition. Research in Human Robot Collaboration targets the Industry 4.0 where robots will help and augment humans to achieve increasingly complex tasks.

In this research, we introduce the concept of “cobotic system”. Such a system considers humans and robots - with possibly different roles - as interacting elements sharing a common purpose of solving a task. Clearly, creation of cobotic systems has to take into account emerging technologies, but it also has to include humans through activity analysis, knowledge formalization, and participative simulations. To do so, under the leadership of Safran Group, this cognitive engineering thesis has been completed as a team with the roboticist David Bitonneau.

Together, we proposed the “cobotic system engineering”: a cross-disciplinary approach of cobotic system design. This methodological approach was motivated by an industrial need from Airbus Group: the difficulty of tank cleaning. We tackled this project from needs analysis to the creation of a prototype evaluated by actual operators. Additionally, the industrialization of our work is in progress.

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

Mon premier remerciement est à l'attention de David Bitonneau, mon indéboulonnable « binôme cobotique ». Merci pour ton ouverture, ton humour, et ton esprit critique. Nous sommes devenus bien plus que collègues. Merci à Jean-François Thibault, que j'estime beaucoup et qui a été un grand contributeur de cette thèse. Simon Kamatchy, merci d'être un excellent collègue et un si bon ami. Je remercie Christine Marraud pour son support et ses conseils. Faire partie de son service pendant trois ans aura été un réel plaisir.

Je n'oublie pas le service Procédés, merci à Vincent, Rémy, Aurélie, Anaïs, Sabine, Laurianne, Samuel, Guillaume et Perrine. Vous avez toujours été là pour m'aider. Je n'oublie pas non plus mes autres nombreux collègues à Ariane Group, Christophe, Eric, Lionel, Maxime, Mohamed, Patrick G., Patrick S., Philippe et Sylvain ; sans vous, ces trois années m'auraient certainement paru plus longues.

Je remercie aussi Serge, Pascal et Nicolas de Safran Aircraft Engines, ainsi que Christophe et Patrick de Safran Electronics and Defense, pour toutes les discussions passionnantes que nous avons eues sur la collaboration homme-robot.

Merci à tous ceux qui ont « subi » les différents essais que nous avons menés au cours de cette thèse, merci de votre patience et de votre bienveillance. Je tiens également à remercier les trois stagiaires que nous avons encadrés, Roxane, Alexis et Nicolas, pour m'avoir tant appris.

J'aimerais ensuite remercier chaleureusement Jean-Marc Salotti d'avoir accepté de diriger ma thèse, merci beaucoup Jean-Marc.

Je remercie profondément Bernard Clavier pour ses orientations décisives, son exigence, la générosité de ses retours et ses récits du Japon, du Pays Basque et d'ailleurs.

Au laboratoire de recherche, je remercie Jean-Marc André pour son soutien déterminant, ainsi que Jérôme Sarracco et Véronique Lespinet pour leur aide précieuse. Bien entendu, un merci spécial aux doctorants du laboratoire, Damien, Quentin et Baptiste. Rire, manger, refaire le monde de la cognitive, inventer un sport, faire du café, et bien d'autres choses que je tairai ont animé la rédaction de ce document. Je remercie aussi les ex-doctorants Amélie Roche et Jean-Charles Bornard qui ont plus participé à cette thèse qu'ils ne le pensent.

Pascale, merci infiniment pour le temps que tu as accordé à mon travail.

Enfin, je profite de l'occasion pour adresser quelques mots plus personnels à mes proches.

Je remercie mes grands-parents, mes oncles, mes tantes et mes cousins. Merci de former une vraie famille, vous faites partie de moi.

Forcément, mes parents ont une place à part dans ces remerciements. Vous êtes les meilleurs, vous êtes des exemples pour moi, merci.

Merci à Martin et Victor, mes frères géniaux. À trois, on est bien plus forts.

Loïc, merci pour tout, tu es extraordinaire.

Merci à mes amis Guigui, Ludo, Virgile, Babeuh, Lola et Simon. Vous comptez tous beaucoup pour moi.

Je remercie aussi J.-P., Nat., Mario et Marie, la rencontre de chacun d'eux fut belle, merci pour tous ces moments de bonheur.

Élisa, merci d'être Élisa.

Table des matières

Résumé	3
Abstract	4
Remerciements	5
Table des matières	7
Introduction	11
Contexte de la cobotique	11
Contexte de la thèse.....	13
Organisation du manuscrit.....	14
Chapitre 1 De la « robotique classique » à la « cobotique »	15
1.1 Robot et robotique industrielle	15
1.1.1 Définitions : robot et robotique	15
1.1.2 Les robots industriels.....	15
1.1.3 Autres robots dans l'industrie.....	16
1.1.4 La cellule robotisée.....	17
1.2 Tâche et robotisation	18
1.2.1 Les tâches industrielles.....	18
1.2.2 La complexité d'une tâche.....	18
1.2.3 La robotisation « classique »	19
1.2.4 Limite de la robotique « classique » : les tâches complexes	19
1.3 La cobotique industrielle.....	21
1.3.1 Les cobots.....	21
1.3.2 Définition de la cobotique	22
1.3.3 Vers la cobotique industrielle.....	22
1.3.4 Conception de systèmes cobotiques industriels.....	23
Chapitre 2 L'homme et le système cobotique industriel.....	25
2.1 L'homme au travail	25
2.1.1 L'ergonomie et l'activité de travail	25
2.1.2 Socle théorique : modèle du conducteur automobile.....	29

2.1.3	Adaptation du modèle du conducteur pour la cobotique industrielle	32
2.1.4	L'erreur humaine	33
2.2	La collaboration homme-robot	35
2.2.1	Colocalisation, assistance, coopération et collaboration	35
2.2.2	La collaboration homme-robot	36
2.2.3	Les moyens d'interaction homme-robot dans l'industrie	39
2.2.4	Technologies-clés pour l'industrie	40
2.3	Les rôles dans la collaboration	42
2.3.1	Automatisation et autonomie	42
2.3.2	Rôles respectifs de l'homme et du robot	49
2.3.3	Adaptabilité et adaptativité des rôles	52
2.3.4	Apprentissage homme-robot	53
2.4	Les systèmes cobotiques	55
2.4.1	Définition	55
2.4.2	Représentations du système homme-robot	56
2.4.3	Modélisation du système cobotique	57
2.4.4	Les types de systèmes cobotiques	60
Chapitre 3	Méthodologie de conception d'un système cobotique	67
3.1	Critères industriels de l'approche méthodologique	67
3.1.1	Spécificités et contexte chez Ariane Group et Safran Group	67
3.1.2	Performance et aspects économiques	68
3.1.3	Sécurité et réglementation	69
3.1.4	Acceptabilité, acceptation et confiance	71
3.2	Approches méthodologiques pour la cobotique	73
3.2.1	L'approche technocentrée de la « robotique classique »	73
3.2.2	Les guides de conception en robotique et cobotique	75
3.2.3	Retours d'expérience	76
3.2.4	La conception centrée utilisateur	79
3.3	L'opérateur dans la conception	82
3.3.1	Conduite de projet et ergonomie	82
3.3.2	Méthode de gestion de projet	83
3.3.3	Analyse et formalisation de l'activité	85
3.3.4	Simulations	90
3.4	Ingénierie des systèmes cobotiques	93
3.4.1	Interdisciplinarité	93
3.4.2	Ingénierie des systèmes complexes	94
3.4.3	Simulations et systèmes cobotiques	97
3.4.4	Analyse des risques d'un projet cobotique	99

Chapitre 4	Cas d'étude : le nettoyage des cuves	104
4.1	Analyses et formalisation du besoin	104
4.1.1	Analyse de la demande	104
4.1.2	Analyse de l'activité de nettoyage des cuves	108
4.1.3	Résultats de l'analyse de l'activité	111
4.1.4	Formalisation par l'analyse fonctionnelle	114
4.2	Principe de solution	115
4.2.1	Hypothèses sur l'activité future	115
4.2.2	Modélisation d'un principe de solution	117
4.2.3	Simulations et essais pour le principe modélisé	118
4.2.4	Supervision et téléopération	120
4.3	Études de base et maquette interactive	122
4.3.1	Objectifs et hypothèses	122
4.3.2	Protocole de test	123
4.3.3	Résultats	124
4.3.4	Discussion	126
4.4	Études de détail et prototype	127
4.4.1	Point sur la structure du projet	127
4.4.2	Objectifs et consultation de fournisseurs	127
4.4.3	Mise au point et essais simples	129
4.4.4	Simulation participative	131
Chapitre 5	Déploiement de la méthodologie	137
5.1	Transfert de l'approche méthodologique	137
5.1.1	Activité de finition d'objet pyrotechnique	137
5.1.2	Activité de démoulage de blocs pyrotechniques	139
5.1.3	Activité de manutention d'armatures	141
5.1.4	Communication en entreprise	142
5.2	Bilan sur l'approche méthodologique	142
5.2.1	Vers l'industrialisation du nettoyage des cuves	142
5.2.2	Retour d'expérience	143
5.2.3	Limites et perspectives	145
5.2.4	Développement d'un outil pour la conception	146
5.3	L'usine cobotique du futur	149
5.3.1	La cobotique au-delà d'Ariane Group	149
5.3.2	Le système cobotique du futur	150
5.3.3	Les systèmes cobotiques dans l'Industrie du Futur	151
5.3.4	Éthique	152
Conclusion	155

Productions scientifiques et techniques.....	159
Publications et communications avec actes.....	159
Communications et conférences.....	159
Participations.....	160
Évènements.....	160
Visites de sites industriels et technologiques.....	160
Encadrement d'étudiants.....	160
Notes techniques et communications internes Ariane Group.....	161
Notes techniques.....	161
Communications au sein d'Ariane Group.....	162
Communications au sein de Safran Group.....	163
Glossaire.....	164
Bibliographie.....	167

Introduction

Contexte de la cobotique

Depuis des décennies, les réponses apportées pour améliorer la productivité dans les usines manufacturières sont fournies par la robotisation des procédés de fabrication. Cette robotisation correspond à l'introduction de robots, machines capables de capter leur environnement, de traiter l'information à l'aide de processeurs et de se déplacer (ou de déplacer une de leurs parties).

L'amélioration de la performance en remplaçant le travail humain a d'abord été rendue possible grâce à des machines simples. Celles-ci étaient conçues spécifiquement pour réaliser une tâche en boucle ouverte, sans retour d'information sur l'état de cette tâche, sur l'environnement, et encore moins sur l'homme. Désignées « machines spéciales », elles nécessitent un temps de développement long et des coûts d'investissement importants. Les fabricants de machines se sont alors interrogés sur la généricité des dispositifs. Leur objectif était de concevoir des solutions fabricables en série et faciles à maintenir, permettant de réaliser un large éventail de tâches. C'est ainsi que les robots industriels sont apparus.

Pour réaliser une tâche, un robot industriel doit être équipé d'outils pour agir sur son environnement, de capteurs pour le percevoir, et son comportement doit être programmé. Depuis 1961 et le premier exemplaire de robot industriel Unimate (cf. Figure 1), ces robots se sont multipliés généralement pour accomplir des tâches simples et répétitives, qui étaient initialement réalisées par des opérateurs humains.



Figure 1 : Unimate, le premier robot industriel, photographié lors d'une émission de télévision (Robotic Industries Association, 2017)

Les tâches complexes, variables, pour lesquelles une grande flexibilité est requise, demanderont à un robot une plus grande complexité technologique. Or, l'augmentation de la complexité des moyens de production a plusieurs effets indésirables pour les industriels, très similaires aux inconvénients des machines spéciales :

- hausse du coût d'investissement et de reprogrammation ;
- difficulté de maîtriser le procédé de fabrication, avec une conception bien souvent sous-traitée ;
- difficulté pour les équipes de production d'intervenir sur la cellule en situation transitoire et dégradée ;
- difficulté d'évaluer la maturité de la solution, issue d'assemblage de briques technologiques elles-mêmes plus ou moins matures.

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. Cette idée omet que tous les systèmes, même hautement automatisés, nécessitent l'action d'un opérateur pour les superviser, les ajuster, les maintenir, ou les améliorer par exemple (US Department of Defense, 2012). La conséquence paradoxale en est que les systèmes automatisés sont finalement des systèmes homme-machine, pour lesquels la prise en compte des opérateurs est bien souvent négligée. L'activité de l'opérateur n'a pas été supprimée, mais transformée.

Le faible retour sur investissement de la robotisation de tâches complexes, et le désengagement des opérateurs vis-à-vis de technologies auxquelles ils ne sont pas intégrés rebutent les industriels, et des postes peu performants ou pénibles perdurent dans les usines. L'enjeu européen et français de l'Industrie du Futur¹ est justement de faire évoluer la situation. Parallèlement à l'approche que nous qualifierons de « robotique classique », une autre approche a été amorcée, celle de la conception de systèmes au sein desquels hommes et robots coopèrent : l'approche « cobotique » (issu du néologisme cobot²). Bien que très récente dans l'industrie, cette approche puise son inspiration dans d'autres domaines plus avancés sur l'interaction homme-robot tels que la santé, la défense et la domotique (Khalid, Kirisci, Ghrairi, Klaus-Dieter, & Pannek, 2016).

Sur des postes complexes auxquels les opérateurs ont une expertise à forte valeur ajoutée, il devient alors possible de :

- améliorer la performance 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) ;
- améliorer la flexibilité vis-à-vis de la robotisation, pour mieux réguler les variabilités ;
- 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, réduction de l'espace au sol et des barrières de protection).

Le sujet du présent manuscrit est la conception de systèmes de travail au sein desquels un (ou plusieurs) opérateur(s) et un (ou plusieurs) robot(s) interagissent pour réaliser une tâche industrielle.

¹ « L'Industrie du Futur est un concept générique qui s'inscrit dans une prise de conscience générale de l'importance de l'industrie manufacturière dans la richesse nationale. Cette réflexion est destinée à conserver et développer en France et donc en Europe, une activité industrielle forte, innovante, exportatrice, génératrice de richesses et créatrice d'emplois » (FIM, 2015). Elle concerne l'évolution des marchés et l'impact sociétal, la transformation numérique et technologique, et la préservation de l'environnement.

² Un cobot (Colgate, Wannasuphprasit, & Peshkin, 1996) est un robot spécialement conçu pour partager son espace de travail avec un opérateur en sécurité (cf. 1.3.1).

Pour alléger la formulation, nous évoquerons ici l'interaction entre un seul homme et un unique robot, bien que le propos puisse tout à fait s'adapter aux systèmes impliquant plusieurs hommes et robots.

Contexte de la thèse

En 2012, Safran Group³ 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 de manutention avancé. 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, celui-ci a engendré un accident du travail.

Face à ce retour d'expérience et aux enjeux industriels de la cobotique, Safran a lancé un groupe de travail afin de mieux prendre en compte l'homme (ses besoins, son activité/expertise, la transformation de cette activité/expertise) dans la conception, sans oublier les aspects robotiques et les contraintes liées à la tâche et à son environnement. Il fallait travailler de façon interdisciplinaire sur les aspects méthodologiques de « cobotisation » des postes de travail. Pour ce faire, un binôme d'ingénieurs en cognitique⁴ et robotique, s'appuyant sur le Programme Ergonomie du groupe, a été recruté en thèse dans l'équipe CIH⁵ du laboratoire IMS⁶. À ces compétences s'ajoutent celles en ingénierie des systèmes, apportées par les cursus d'ingénieur des deux doctorants.

Pour se lancer dans cette étude, l'équipe ainsi constituée avait besoin d'un projet concret sur lequel expérimenter. Le groupe Safran a donc lancé un appel dans ses filiales, auquel la société Safran Herakles⁷ a répondu en proposant le sujet « nettoyage des cuves ». Les doctorants ont été directement rattachés à cette société et intégrés aux équipes qui travaillent sur l'élaboration de nouveaux procédés. Afin de mieux connaître les possibilités en robotique dans l'industrie, le groupe de travail s'est rapproché d'un rassemblement de fournisseurs régionaux spécialistes : le Cluster Aquitaine Robotics. Les échanges avec les membres de ce cluster, notamment avec le CEA Tech, CompositAdour et Lucas France, ont contribué aux résultats de cette thèse. L'organisation du projet cobotique est reprise par la

Safran : lancement du projet cobotique (2013)

ArianeGroup et Safran : projet pilote (2014-2017)

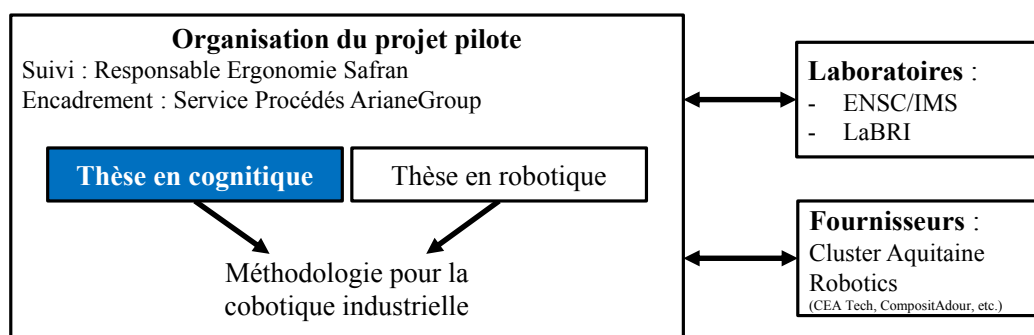


Figure 2.

³ Grand groupe industriel mondial, major dans l'aéronautique, la défense et la sécurité.

⁴ La cognitique est une science interdisciplinaire qui s'intéresse au traitement de la connaissance, qu'elle soit humaine ou informatisée, et à leurs interactions (Claverie, 2005).

⁵ Cognitique et Ingénierie Humaine.

⁶ Intégration du Matériau au Système.

⁷ Devenue Ariane Group en fusionnant avec Airbus Defense and Space en 2016.

Safran : lancement du projet cobotique (2013)

ArianeGroup et Safran : projet pilote (2014-2017)

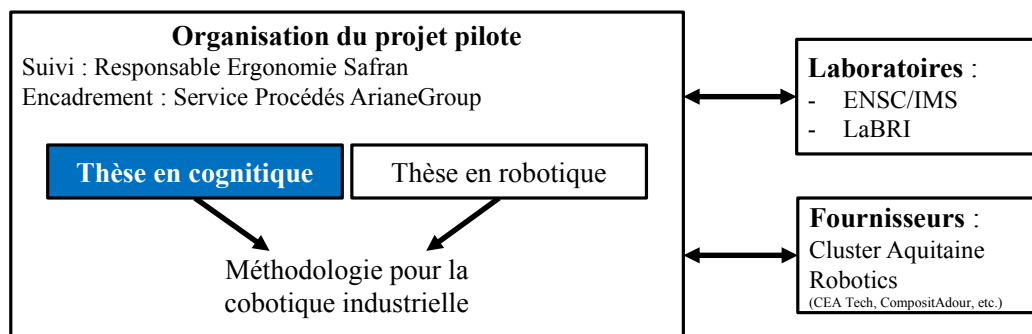


Figure 2 : Structure du projet cobotique au sein de Safran et ArianeGroup

Pour désigner l'objet de l'étude, c'est-à-dire un système au sein duquel homme(s) et robot(s) collaborent, nous avons introduit le terme de « système cobotique ». Ce manuscrit traite d'une approche méthodologique facilitant l'introduction de ces systèmes cobotiques dans l'industrie, abordant plus spécifiquement des aspects d'ingénierie cognitive de la démarche. Cette thèse est complémentaire de celle de David Bitonneau (2018), qui apporte un éclairage de roboticien à la problématique. Ensemble, nous nous sommes basés sur des compétences et technologies issues de la robotique, sur des outils et méthodes de l'ingénierie des systèmes, et sur des méthodes issues de l'ergonomie. Cela a permis de combiner des connaissances sur le robot et sur l'homme au travail pour une approche systémique de la collaboration homme-robot.

Organisation du manuscrit

Le premier chapitre positionne la cobotique par rapport à la robotique classique et pose les deux problématiques de la thèse que sont le système cobotique comme objet d'étude, et l'approche méthodologique pour le concevoir.

Le deuxième chapitre traite de l'homme au travail, puis de sa collaboration avec le robot, de son rôle dans le système cobotique. Ce chapitre propose également une modélisation et une typologie des systèmes cobotiques.

Le troisième chapitre pose d'abord le socle sur lequel s'appuie l'approche méthodologique interdisciplinaire de conception développée chez Safran Group et Ariane Group. L'approche intègre l'opérateur et la technologie dans une proposition qualifiée d'« ingénierie du système cobotique industriel ». Dans ce chapitre, nous avons aussi mis au point un indicateur qui permet de piloter l'intégration de l'homme dans le processus de conception.

Le quatrième chapitre aborde le principal cas d'application de la thèse : le projet « nettoyage des cuves ». Le projet a été conduit depuis l'analyse du besoin jusqu'à un prototype qui prépare l'industrialisation du futur système. En d'autres termes, ce chapitre détaille la principale expérimentation qui a permis de développer l'approche.

Le cinquième chapitre fait état du déploiement de la méthodologie, en premier lieu par la conduite d'autres projets d'Ariane Group, grâce auxquels nous avons récolté de premiers retours d'expérience. Dans ce chapitre, nous ferons également le bilan de l'application de l'approche méthodologique et discuterons ses limites et perspectives. Enfin, nous envisagerons la place de la cobotique dans l'Industrie du Futur.

Chapitre 1 De la « robotique classique » à la « cobotique »

Ce premier chapitre décrit de manière générique la robotique industrielle dite « classique », afin de justifier de l'intérêt d'investiguer une nouvelle voie pour produire avec des robots, et de positionner la cobotique comme une alternative pour l'Industrie du Futur.

1.1 Robot et robotique industrielle

1.1.1 Définitions : robot et robotique

Le mot *robot* a été introduit par l'écrivain de science-fiction tchèque Karel Capek dans une pièce de théâtre (Capek, 1920). Initialement « robota », il désigne alors le travail répétitif et ennuyeux. Ce terme a été utilisé par l'auteur pour désigner des machines à forme humaine qui travaillaient à la place des hommes.

Le mot a évolué, notamment grâce aux auteurs de science-fiction, avant de revenir dans le monde du travail. Nous nous accorderons à définir un robot comme « une machine matérielle qui, sous différentes formes, est essentiellement munie d'*actionneurs* lui permettant de se mouvoir, ou de déplacer une partie de son corps dans l'espace, de *capteurs* qui acquièrent des données sur son environnement (par exemple des caméras) ou sur elle-même (par exemple des codeurs mesurant les rotations des moteurs), ainsi que de *processeurs*, des calculateurs qui sont des moyens de traitement de l'information » (Chatila, 2014).

La robotique est la discipline qui s'intéresse à la conception, à la réalisation, à l'évaluation et à l'utilisation des robots, ainsi qu'à ses conséquences dans la société, au niveau global comme à celui des individus ou des groupes d'individus.

1.1.2 Les robots industriels

Un *robot industriel* est défini, dans la norme⁸ NF ISO 8373 (2012) sur le vocabulaire en robotique, comme un manipulateur à commande automatique, reprogrammable, multi-application, pouvant être

⁸ Une norme est un « document établi par consensus et approuvé par un organisme reconnu, qui fournit, pour des usages communs et répétés, des règles, des lignes directrices ou des caractéristiques, pour des activités ou leurs résultats, garantissant un niveau d'ordre optimal dans un contexte donné », selon la Directive ISO/CEI (2004).

programmé suivant trois axes ou plus, qui peut être fixe ou mobile, destiné à être utilisé dans les applications d'automatisation industrielle. Il existe plusieurs types de robots industriels.

Le plus répandu est le robot articulé, aussi désigné « bras manipulateur » en raison de sa ressemblance à un bras humain. Le plus souvent, sa structure est en quelque sorte composée d'une épaule, d'un coude et d'un poignet, reliés par des segments, et d'un outil placé à son extrémité. C'est cet outil, appelé « effecteur », qui constitue en général la spécificité du robot. Les roboticiens dans l'industrie parlent même alors de « métier » du robot.

Un autre type de robots industriels, proche du précédent, est le type SCARA⁹. Classiquement, il dispose de trois articulations cylindriques pour se déplacer suivant un plan parallèle au sol, et un axe supplémentaire permet à l'effecteur de translater verticalement. Les robots SCARA sont utilisés la plupart du temps pour des tâches précises nécessitant peu de variétés de mouvement, comme dans l'assemblage de cartes électroniques.

Il existe également des robots « continuum » (Walker, 2016), dont les articulations sont nombreuses et rapprochées, qui rendent leurs déplacements semblables à ceux d'un serpent. Cette configuration est notamment utile pour des environnements spatiaux contraints, comme l'inspection de conduits.

Ces architectures de robot (robot articulé et SCARA) sont sérielles, les segments sont disposés les uns à la suite des autres, reliés par des articulations. Il existe par ailleurs d'autres types de structure de robots industriels.

Les structures parallèles rattachent l'effecteur du robot à sa base par plusieurs chaînes cinématiques. Cela permet d'améliorer la rigidité et la précision du robot. Comme les robots SCARA, les robots parallèles sont principalement utilisés pour des tâches précises et peu variées.

Les robots cartésiens permettent un déplacement dans l'espace à l'aide d'axes de translation. On les trouve souvent dans des entrepôts, pour la manutention de cartons par exemple.

1.1.3 Autres robots dans l'industrie

Jusqu'ici, les types de robots évoqués sont considérés comme des robots industriels. On retrouve cependant de plus en plus de robots appartenant à la famille des *robots mobiles* dans l'industrie. Les robots mobiles peuvent se déplacer dans les airs, sur le sol, sur l'eau ou sous l'eau. Ils ont une structure spécifique à leur type de déplacement dans leur environnement. Par exemple, les robots mobiles terrestres disposent en général de « jambes » ou de roues, et les robots mobiles aériens ou sous-marins sont pourvus d'hélices. Dans l'industrie, ils sont principalement utilisés pour des opérations de logistique, de surveillance ou de téléprésence¹⁰.

D'autres dispositifs, par définition très proches de l'homme, sont également considérés comme des robots : ils appartiennent à la famille des *exosquelettes* ou orthèses robotiques. Ce sont des robots revêtus par l'homme. Dans l'industrie, ils ont principalement vocation à soulager physiquement les opérateurs. Cependant, les bénéfices sur la santé de l'utilisation de ce type de dispositif sont encore difficiles à estimer. À noter que seuls les exosquelettes actifs, c'est-à-dire programmables, répondent à la définition de robots. Les exosquelettes passifs sont ici considérés comme des moyens mécaniques d'assistance.

⁹ Selective Compliance Articulated Robot Arm.

¹⁰ La téléprésence regroupe l'ensemble des techniques permettant à une personne distante de percevoir la situation et de communiquer. Dans l'industrie, cela peut par exemple permettre à un expert d'aider à une opération de maintenance que lui seul sait effectuer.

Il est de plus possible de combiner différents types d'architecture pour obtenir une solution correspondant au mieux à un besoin industriel. Il est alors question de *robot hybride*. La structure hybride la plus répandue est constituée d'un bras articulé positionné sur un axe linéaire (cartésien) ou embarqué sur un robot mobile pour étendre l'espace de travail.

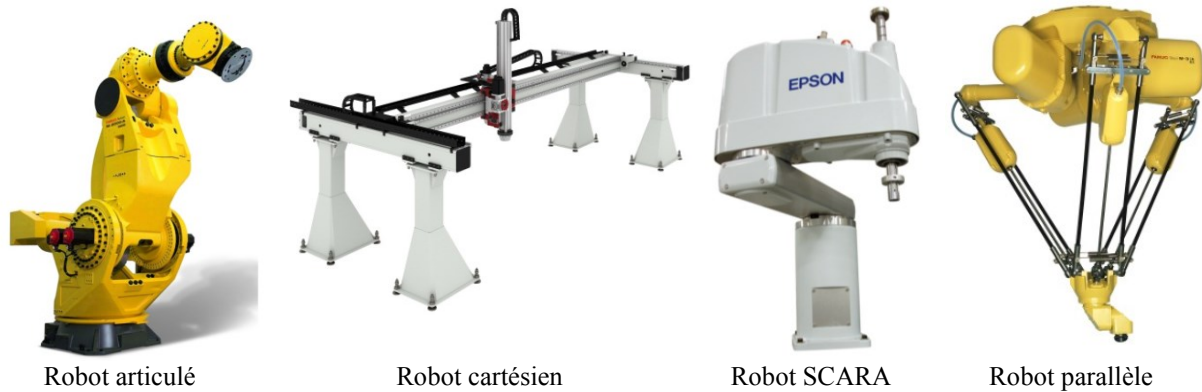


Figure 3 : Types de robots industriels classés suivant leur structure mécanique (International Federation of Robotics, 2015)

Dans les usines, les robots ne sont pas isolés, ils sont systématiquement intégrés dans leur environnement. Pour l'intégration du robot, on lui ajoute des outils, un socle, des capteurs, des dispositifs de sécurité, etc. Pour les robots industriels, l'ensemble résultant est appelé « cellule robotisée ».

1.1.4 La cellule robotisée

La cellule robotisée est la forme la plus répandue sous laquelle on trouve les robots dans l'industrie. C'est un dispositif technique comprenant un ou plusieurs robots, dédié à une tâche industrielle (ou à une série de tâches). Elle est munie d'une enceinte close ou de capteurs de présence pour éviter l'intrusion d'opérateurs pendant son fonctionnement. Le plus souvent, dès que la cellule est ouverte ou détecte une présence, le robot stoppe son activité. Elle est composée de capteurs, d'effecteurs, de barrières, de porteurs de robots, de convoyeurs de pièce et de changeurs d'outil par exemple.

Pour interagir avec le robot, lors de reprogrammations ou de maintenances par exemple, l'opérateur doit utiliser un *teach pendant*¹¹, sorte de « télécommande » du robot. Le *teach pendant* permet à la fois des opérations complexes accessibles uniquement aux roboticiens (Rahimi & Karwowski, 1990) et des fonctions plus simples pouvant être réalisées par des opérateurs spécialistes de la tâche (Deisenroth & Krishnan, 1999).

Lors de projets de robotisation, ces cellules sont conçues par les roboticiens, qui choisissent le matériel en fonction de contraintes techniques. Le robot peut être choisi en fonction de son nombre de degrés de liberté pour la variété des mouvements possibles, de son amplitude/sa mobilité, de sa charge utile et de sa précision.

¹¹ Le terme le plus utilisé est le terme anglais *teach pendant* bien que la traduction « pendant d'apprentissage » existe.

En production, les cellules robotisées permettent de réaliser les opérations prédéterminées par les concepteurs roboticiens, dans le contexte prévu. Elles ne sont pas capables de réguler les variations inattendues, ce qui peut le cas échéant faire chuter la productivité (Bainbridge, 1983).

Dans cette thèse, nous regrouperons tous les dispositifs techniques relatifs au robot, dont son programme informatique, sous le terme « système robot ».

1.2 Tâche et robotisation

1.2.1 Les tâches industrielles

La finalité des systèmes robot industriels est d'accomplir une ou plusieurs tâches avec efficacité et efficience. La tâche est la réalisation d'un procédé pour atteindre des objectifs. Les tâches industrielles sont multiples et variées. Nous en avons recensé les exemples les plus courants sur le Tableau 1.

<i>Transformation de pièce</i>	Moulage, usinage, perçage, rectification, etc.
<i>Préparation de surface</i>	Peinture, enduction, projection thermique/plasma, grenailage, etc.
<i>Assemblage</i>	Rivetage, vissage, soudage, insertion, collage, etc.
<i>Manutention</i>	Manipulation de pièce, chargement/déchargement de machine, positionnement, etc.
<i>Dispensing¹²</i>	Approvisionnement, remplissage, etc.
<i>Palettisation et conditionnement</i>	Filmage, mise en carton, etc.
<i>Inspection et test</i>	Ultrason, rayon X, etc.
<i>Nettoyage</i>	

Tableau 1 : Les différents types de tâche en robotique industrielle (Bitonneau, 2018)

La caractéristique clé de la tâche à laquelle nous nous attacherons est sa *complexité*. En effet, c'est la complexité de la tâche qui aura l'impact le plus important sur la complexité et la structure du système la réalisant, qu'il soit composé d'agents humains et/ou robotiques.

1.2.2 La complexité d'une tâche

Nous définirons une tâche complexe comme une tâche irréductible en sous-tâches simples. Il est impossible de décrire une tâche complexe de façon exhaustive. L'imprévisibilité des conditions de réalisation et des conséquences des actions participent à la complexité.

Le système accomplissant une tâche complexe doit s'adapter aux variations de l'environnement, aux perturbations, et prendre des décisions dont les conséquences sont souvent imprévisibles. La réalisation d'une tâche dans un environnement dynamique¹³ est particulièrement sujette aux variations, à l'adaptation permanente. Sa complexité dépend par exemple de la dynamique de la situation, qui contraint l'intervention, ou de l'instabilité du processus (Cellier, 1996).

¹² *Dispensing* pourrait être traduit par « déversement ».

¹³ Un environnement dynamique est une situation qui évolue en l'absence d'action du système étudié (Cellier, 1996).

Il est évident que l'homme et le robot n'ont ni les mêmes possibilités ni les mêmes limites, des points de vue physique, cognitif, sensoriel, etc. Ainsi, l'un et l'autre ont des aptitudes différentes à réaliser ou à contribuer à la réalisation de certaines tâches.

1.2.3 La robotisation « classique »

La robotisation, substitution d'un travail manuel par un robot, est principalement motivée par des raisons économiques : augmenter la cadence de production, réduire le nombre d'opérateurs humains. La démarche de robotisation dite « classique », bien souvent menée par des roboticiens¹⁴, tente au maximum de répondre à ces objectifs en mettant à profit les atouts des robots, dont les principaux sont la rapidité, la force, la précision, la répétabilité, l'endurance, et la capacité de traitement de grandes quantités de données (Devy, 2012). À la question « que faut-il robotiser ? », la réponse a souvent été la robotisation de « tout ce qui est techniquement robotisable » (Dekker & Woods, 2002). Ainsi, l'allocation des tâches à l'homme et au robot mène souvent à la répartition proposée par le Tableau 2.

Robot	Opérateur
Soudage, peinture, assemblage, manutention, traitement de surface, etc.	Maintenance (tâche à écourter au maximum) (valorisante) Programmation (avec <i>teach pendant</i> , manipulation directe ou programmation en ligne) (valorisante) Supervision (souvent monotone) Intervention pour aider (pour réguler des variabilités non prévues comme la chute d'une pièce par exemple) Tâches restantes difficiles à automatiser Remplacer le robot pendant les pannes (à prendre en compte en conception pour éviter les accidents)

Tableau 2 : Les tâches habituelles de l'homme et du robot selon Helander (1990)

Cette vision visant à robotiser au maximum, de façon systématique, n'est pas unanimement acceptée, en particulier par les utilisateurs de la technologie. Toujours selon Helander (1990), différents problèmes liés au rôle de l'opérateur apparaissent. Les tâches de supervision, d'intervention pour « aider le robot », les tâches restantes comme « bouche-trous » entre deux tâches automatisées, et le remplacement du robot pendant les pannes sont peu valorisantes pour l'opérateur, ce qui provoque son désengagement. Certaines des interventions de l'opérateur (comme la maintenance) sont peu habituelles, et comportent de ce fait un risque d'accident supérieur à celui d'une situation de travail manuel. La répartition des tâches se fait non pas en fonction des capacités de l'opérateur, mais en fonction de celles du robot, voire de celles du roboticien à automatiser l'opération. Enfin, on confie toute l'autorité et peu de tâches à un opérateur alors « hors de la boucle »¹⁵ (Iganaki, 2003).

Il faut donc veiller à la prise en compte de l'homme, même pour des tâches pressenties comme « totalement robotisables ».

1.2.4 Limite de la robotique « classique » : les tâches complexes

La robotisation « classique » a démontré de grandes performances pour des opérations correspondant exactement à ce pour quoi les robots ont été préprogrammés. Mais ces performances se limitent à des situations bien définies, prévues en amont par les concepteurs. Il est bien plus ardu de concevoir des dispositifs plus « intelligents », capables non seulement de capter, mais aussi de « comprendre »

¹⁴ Les roboticiens sont les ingénieurs, techniciens et chercheurs du domaine de la robotique.

¹⁵ Traduit de l'anglais *out-of-the-loop*, signifiant que l'homme n'est pas inclus dans la boucle de décision.

l'environnement dans lequel ils évoluent, en le prenant en compte en même temps que le but visé. La principale limite des systèmes robotisés est la nécessité d'une intervention humaine, bien souvent coûteuse, pour gérer les cas non prévus par les concepteurs (Endsley, 2015).

La robotique classique ne permet pas de répondre à de nombreuses problématiques industrielles. Elle n'apporte pas de solution pour des tâches qui requièrent une expertise¹⁶ en perception, décision, ou dextérité, trop chère à robotiser ou dont la robotisation n'est pas suffisamment robuste, voire dont la faisabilité robotique est actuellement inaccessible (Hägele, Schaaf, & Helms, 2002; Spath, Braun, & Bauer, 2009). L'homme, bien plus autonome¹⁷, parvient à réguler les variabilités de la situation en faisant appel à des processus cognitifs complexes, basés sur ses connaissances, pour se représenter la situation et s'y adapter, pour atteindre les objectifs haut-niveau qu'il s'est fixés. Ainsi, l'homme a une capacité supérieure à garder en tête les objectifs haut-niveau de la tâche, à évaluer et réguler de nouvelles situations. Il reste tout de même limité physiquement (force et fatigue par exemple) et cognitivement, notamment dans le traitement de gros volumes de données, là où le robot peut lui être d'une aide précieuse.

La réalisation de tâches complexes par un système nécessite qu'il soit robuste aux variations internes et externes, c'est-à-dire qu'il ait la capacité de prévoir les perturbations, de les éviter, et de rétablir la situation suite à une perturbation (Hollnagel, Woods, & Leveson, 2006; Fiskel, 2003). Cette capacité, très liée à l'autonomie, à la capacité d'adaptation et à la fiabilité, est souvent retrouvée sous l'appellation de *résilience* (Zieba, Polet, Vanderhaegen, & Debernard, 2010).

Le concepteur cherchant à robotiser autant que possible, dans une approche technocentrée, va traiter la complexité de la tâche en compliquant le système technique. Il tente en vain d'anticiper l'imprévisible, c'est-à-dire toutes les situations possibles de la tâche complexe, pour inculquer au robot une solution pour les gérer.

La collaboration homme-robot peut permettre de passer de tels systèmes, purement technologiques, sensibles aux variabilités, à des systèmes robustes (Endsley, 2015). Au sein d'un système de travail homme-robot-tâche¹⁸, l'équipe homme-robot régule son activité en fonction des variabilités de la tâche (cf. Figure 4).

¹⁶ Non seulement l'expert a plus de connaissances que le novice, mais celles-ci sont mieux organisées. L'expert est donc plus performant pour des tâches appartenant à son domaine, ses connaissances étant spécifiques à celui-ci (Bédard & Chi, 1992).

¹⁷ Capable de s'autogouverner, de redéfinir ses objectifs (cf. 2.3.1).

¹⁸ Nous appellerons plus tard ce type de système un *système cobotique* (cf. 2.4).

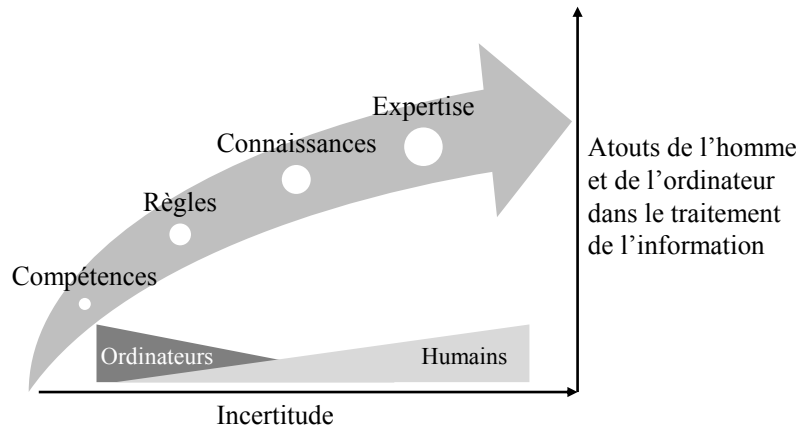


Figure 4 : Force de l'homme et de l'ordinateur dans le traitement de l'information en fonction de l'incertitude (Cummins, 2014)

Malgré l'apparente simplicité de certaines d'entre elles, les tâches industrielles sont pour la plupart complexes. Face aux dimensions de la complexité, les progrès importants en intelligence artificielle ne suffisent pas pour égaler la cognition humaine, sa plasticité et son pouvoir d'adaptation. Pour un grand nombre de tâches, la préservation d'une performance globale satisfaisante impose la présence de l'homme, et par conséquent son intégration dans la conception.

1.3 La cobotique industrielle

La cobotique, collaboration homme-robot, est une voie pour améliorer la production industrielle. Le mot « cobotique » est issu de « cobot », nouveau type de robot apparu ces dernières années. Nous positionnerons la cobotique comme un champ plus large que l'étude de ce type de robot, puisqu'elle s'intéresse également à l'homme et aux interactions homme-robot.

1.3.1 Les cobots

Le terme « cobot », néologisme contractant « robot » et « coopération », est apparu bien avant celui de cobotique. Il a été introduit et initialement utilisé pour désigner des dispositifs d'assistance physique passifs, qui guident les opérateurs. Le guidage est réalisé par l'intermédiaire de « surfaces virtuelles », qui sont des « guides invisibles » pour le geste (Colgate, Wannasuphprasit, & Peshkin, 1996). Il fut employé pour la première fois au milieu des années 90 par des chercheurs américains motivés par l'industrie automobile, financés par la General Motors Foundation et la National Science Foundation (Peshkin & Colgate, 1999).

Plus tard, le terme a été utilisé par les fabricants de robot et les industriels pour désigner un nouveau type de robot ayant les dispositifs de sécurité (propriétés mécaniques et/ou électroniques) suffisants pour pouvoir fonctionner dans le même espace de travail que l'homme. Le cobot peut par exemple être capable de détecter l'opérateur, d'adapter sa vitesse à sa présence, ou bien d'éviter des collisions. Il est le plus souvent de type « bras manipulateur ».

Ainsi, un cobot est un robot spécialement conçu pour partager son espace de travail avec un humain, amplifier ou fiabiliser son action ou son comportement sans le mettre en danger. Dans cette thèse, nous utiliserons cette définition largement partagée dans l'industrie.

1.3.2 Définition de la cobotique

La cobotique ne se limite pas à l'étude des cobots, qui sont des dispositifs techniques. Elle s'intéresse plutôt à l'interaction, directe ou téléopérée, entre opérateur(s) humain(s) et système(s) robot pour atteindre un objectif¹⁹ commun (Claverie, Le Blanc, & Fouillat, 2013). Le champ de la cobotique industrielle englobe les systèmes de comanipulation, de colocalisation collaborative, de téléopération ou d'exomanipulation²⁰ (Kleinpeter, 2015), comme cela est proposé par différentes revues de l'état de l'art sur l'interaction homme-robot (Goodrich & Schultz, 2007; Bauer, Wollherr, & Buss, 2008).

La cobotique est un domaine en développement, envisagé pour augmenter la performance dans les ateliers et supprimer les tâches les plus fatigantes ou dangereuses. Elle ouvre à des performances nouvelles en couplant les capacités de l'informatique (en particulier en intelligence artificielle) avec les dispositifs électromécaniques (robots) pour transformer le travail des opérateurs (Akella, et al., 1999).

Cette discipline est donc à la croisée de la cognitique (pour l'étude de l'hybridation de la cognition humaine avec des technologies robotiques), de l'ergonomie, de la biomécanique et de la robotique. N'étant incluse dans aucune de ces disciplines, la cobotique est transdisciplinaire.

1.3.3 Vers la cobotique industrielle

La cobotique est par ailleurs pleinement intégrée dans l'Industrie du Futur (Gosse & Dancette, 2016; Alliance Industrie du Futur, 2016) depuis la publication du plan France robot initiative par le ministre du Redressement productif, Arnaud Montebourg, en 2013. Dans la continuité, au début de l'année 2015, le ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique place la cobotique comme le 10^e des 47 points des « Technologies clés 2020 », sous la désignation « Cobotique et Humain Augmenté » (Direction Générale des Entreprises, 2015). La FIM²¹ (2015) l'a également placée comme domaine émergeant pour gagner en flexibilité dans l'Industrie du Futur (cf. Figure 5).

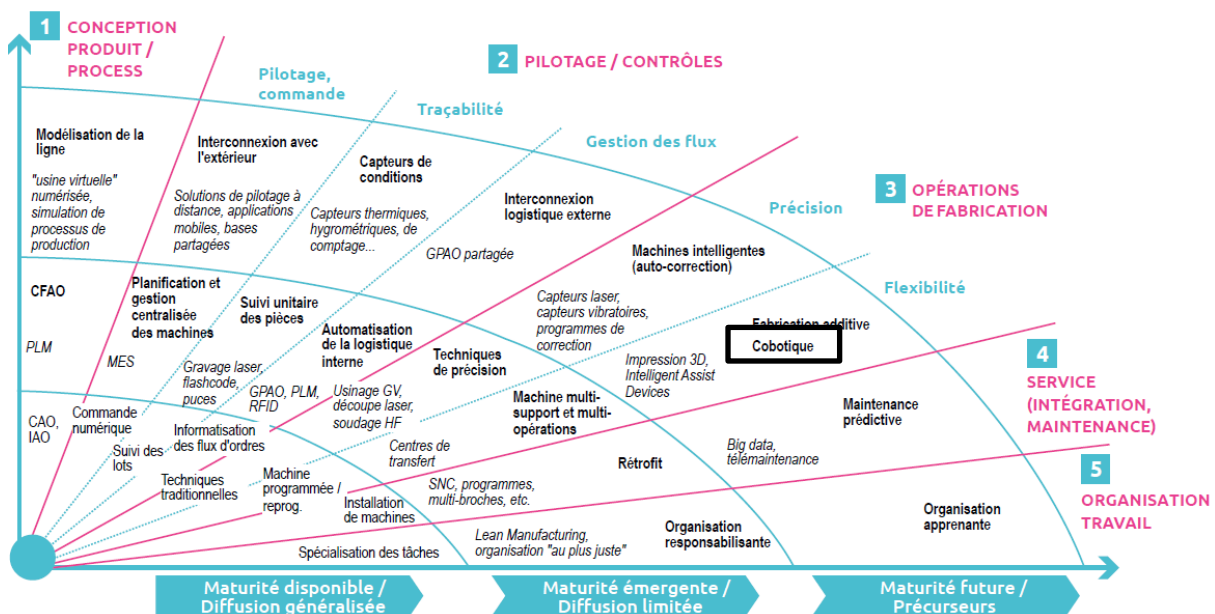


Figure 5 : L'Industrie du Futur : Enjeux et panoramas de solutions (FIM, 2015)

¹⁹ Dans l'industrie, on préfère parler de tâche plutôt que d'objectif, pour y inclure le procédé de fabrication.

²⁰ Ces types de système sont respectivement décrits dans la section 2.4.4.

²¹ Fédération des Industries Mécaniques.

Par ailleurs, la formation s'organise en France. Une option interdisciplinaire réunissant des écoles d'ingénieurs en cognitive et en informatique a été créée sur le campus de Bordeaux entre l'ENSC et l'ENSEIRB-MATMECA, ainsi qu'un master « Robotique collaborative » à l'ENSAM de Lille, qui s'appuie sur une plateforme technologique.

Devant l'effet de mode, les industriels parlent également de plus en plus de cobotique, et veulent de plus en plus de cobots dans les usines. Ainsi, depuis quelques années, de nombreux cobots fonctionnant sans intervention humaine sont installés, bien souvent par des roboticiens. Ces applications issues d'approches technocentrées se répandent alors que les systèmes cobotiques réellement collaboratifs sont encore rares.

Dans cette thèse, nous excluons de la cobotique les « cobots sans homme ». Nous ne discuterons donc pas ce type d'application. L'approche cobotique développée ici s'intéresse aux systèmes homme-robot-tâche, au-delà du type de robot utilisé.

1.3.4 Conception de systèmes cobotiques industriels

Bien que la cobotique semble être un domaine émergent, nos recherches s'inscrivent dans la continuité de travaux scientifiques connexes, comme ceux sur l'homme au travail en ergonomie, ceux de la robotique interactive, ceux qui concernent la conception centrée utilisateur, ou encore l'ingénierie des systèmes. Cette thèse profite du caractère transdisciplinaire du champ d'étude pour se baser sur ces travaux dans l'étude des systèmes homme-robot-tâche.

Pour concevoir ce que nous appelons un « système cobotique industriel », les recherches faisant l'objet de cette thèse ont été effectuées en binôme d'ingénieurs en cognitive et robotique, dans le cadre de contrats CIFRE à Ariane Group et Safran Group, au sein du laboratoire IMS. Dès le départ, les rôles ont été assignés par l'industriel : une thèse porte sur les dimensions techniques (Bitonneau, 2018), l'autre sur la dimension humaine de la conception de systèmes cobotiques (celle-ci). Cette équipe initialement pluridisciplinaire, depuis devenue interdisciplinaire, a été à l'origine de résultats communs qui sont discutés suivant deux angles différents dans les thèses. Ce manuscrit adopte le point de vue cognitive pour aborder l'aspect humain du système cobotique industriel.

Ce premier chapitre explique les motivations à l'origine des thèses. Ainsi, le premier objectif, tant sur le plan académique qu'industriel avec la volonté de Safran Group et Ariane Group, est de décrire cette nouvelle voie pour la production qu'est la cobotique. De quels types de systèmes s'agit-il ? Et en particulier pour cette thèse, quel est la place et le fonctionnement de l'homme vis-à-vis de ceux-ci ? Comment décrire et modéliser le fonctionnement des systèmes cobotiques ? Ces questions sont traitées de façon théorique dans le Chapitre 2.

Le deuxième objectif est tout aussi important. En effet, après avoir décrit les systèmes cobotiques, la question qui émerge immédiatement est celle de la démarche à mettre en œuvre pour l'ingénierie des systèmes cobotiques. Le Chapitre 3 pose les bases théoriques d'une approche méthodologique pour la conception de ces systèmes.

Ces deux problématiques n'auraient pu être traitées de manière théorique sans un cas concret d'application industrielle. C'est ainsi que nous avons, au sein d'Ariane Group, mené un projet industriel pour confronter la théorie aux réalités du terrain. Ce cas d'étude est décrit au Chapitre 4.

Enfin, l'étude s'inscrivant dans un contexte plus large que celui détaillé au Chapitre 4, le Chapitre 5 propose un rapide retour d'expérience sur d'autres applications industrielles, dresse un bilan sur les recherches menées dans cette thèse, et discute les perspectives de l'Usine Cobotique du Futur.

Chapitre 2 L'homme et le système cobotique industriel

Cette thèse porte sur la conception de systèmes industriels au sein desquels l'homme et le robot collaborent. Pour concevoir ces systèmes, il convient donc d'en décrire et d'en comprendre le fonctionnement.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons d'abord à l'homme, à son fonctionnement interne en situation de travail. Nous nous appuierons sur l'ergonomie de l'activité pour décrire l'homme au travail comme agent de régulation. Afin de mieux comprendre ces régulations, un modèle de la cognition du conducteur automobile sera adapté au cas d'un opérateur dans l'industrie.

Nous aborderons ensuite la collaboration homme-robot et les moyens d'interaction qui la rendent possible. Pour la collaboration, nous justifierons une approche basée sur les rôles de l'homme et du robot plutôt qu'une approche de répartition des fonctions.

L'homme, le robot et leur tâche industrielle sont inclus dans un système désigné « système cobotique », pour lequel nous proposons une définition, une modélisation et une typologie.

2.1 L'homme au travail

2.1.1 L'ergonomie et l'activité de travail

Le terme « ergonomie » est étymologiquement issu du grec ancien *ergon* (travail) et *nomos* (loi). L'ergonomie s'intéresse à l'homme en activité dans son environnement de travail. La finalité première de l'intervention ergonomique est de transformer le travail pour que l'activité des opérateurs²² n'altère pas leur santé, et ce en atteignant les objectifs économiques de l'entreprise (Guerin, Laville, Daniellou, Duraffourg, & Kerguelen, 1991). Lors de son intervention dans l'industrie, l'ergonome s'intéresse donc à la santé et au bien-être des opérateurs, en y intégrant de façon tout aussi importante la performance, prenant en compte les critères de qualité, de productivité, de compétences et de fiabilité (Blanchard & Ollivier, 2015).

Cette discipline distingue clairement la tâche de l'activité. En ergonomie, la tâche est une action (ou un ensemble d'actions) que doit effectuer l'opérateur pour atteindre ses objectifs (travail prescrit),

²² Un opérateur est un homme au travail.

alors que l'activité correspond à l'enchaînement de toutes les actions d'un travailleur au sein d'un système de travail (travail réel) (NF EN 614-1+A1, 2009). L'activité est par ailleurs définie comme un ensemble d'actes coordonnés permettant d'atteindre un but global (Leontiev, 1974). Si la différence entre tâche et activité est si importante, c'est qu'elle permet de distinguer le travail prescrit du travail réel des opérateurs.

Béguin (2007) apporte une précision à la définition, indiquant que l'activité est plus que la somme des conditions limites (psychologiques ou physiologiques) de travail. Il donne un exemple pour expliquer son affirmation : « une identification des caractéristiques de l'audition humaine ne permet pas de savoir que pour conduire telle machine, le bruit de l'usinage est un indice de premier plan pour le mécanicien qui réalise la maintenance. Si on capote la machine sans tenir compte de ce fait, le régleur travaillera donc capot ouvert, c'est-à-dire sans protection, et en y mettant en jeu sa santé ».

De plus, un opérateur doit gérer à la fois les activités de production pour répondre aux contraintes de production immédiates, et les activités de prévention pour pérenniser l'activité, se prémunir contre des écarts potentiels ou des arrêts de production (Faverges, 1972).

Pour décrire le travail réel de l'opérateur, c'est-à-dire la façon dont il fait face à la fois aux prescriptions et aux conditions réelles, un schéma est largement utilisé en ergonomie, repris sur la Figure 6. Cette représentation place l'activité de travail au centre de l'organisation. Les déterminants qui influent sur l'activité de travail sont soit liés à l'entreprise, soit liés à l'opérateur. Régulant en fonction de ces déterminants, l'opérateur travaille, ce qui a des conséquences pour lui (sur sa santé, sécurité, mais aussi son développement personnel), et pour l'entreprise, du point de vue de la productivité et de la qualité. Enfin, les conséquences de l'activité pour l'opérateur et l'entreprise vont avoir un impact sur les déterminants. Par exemple, l'opérateur cherchera de nouvelles tactiques pour s'économiser, un retard pris dans la production amènera des contraintes temporelles plus fortes pour réaliser l'activité, etc.

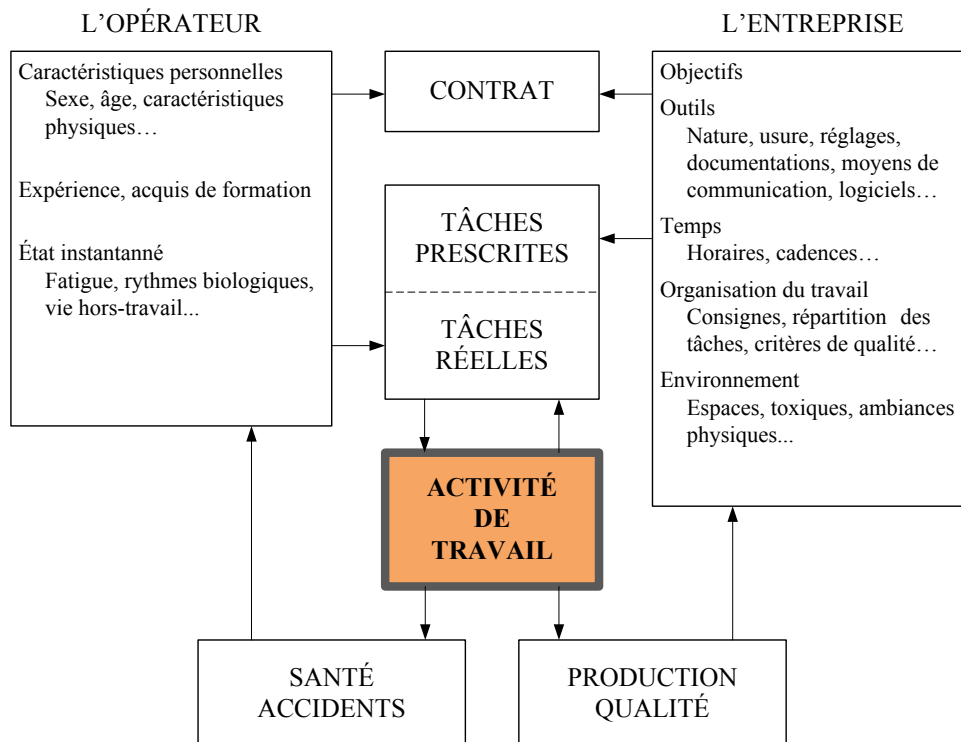


Figure 6 : Déterminants et conséquences de l'activité de travail (Guerin, Laville, Daniellou, Duraffourg, & Kerguelen, 1991)

La Figure 7 est une illustration simplifiée, plus opérative, de la façon dont l'homme réalise son activité. Il régle en fonction des déterminants, qui présentent des variabilités, et des conséquences pour lui et pour l'entreprise.

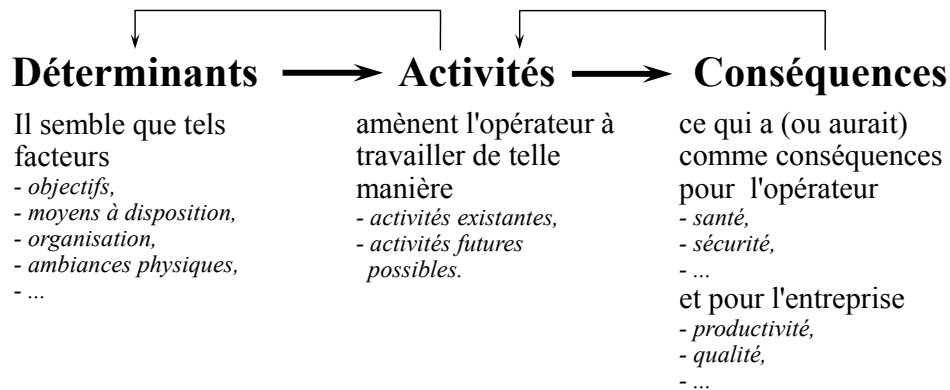


Figure 7 : Déterminants, activités et conséquences du travail humain

Ainsi, l'activité de l'opérateur organise un compromis, pour faire face aux différentes variabilités, variations des déterminants de l'activité. Guerin et al. (1991), dans leur schéma (cf. Figure 8), reprennent les variabilités suivant leur origine : tout d'abord, celles relatives aux opérateurs, qu'elles soient inter-opérateur (force physique, capacités cognitives, taille, âge, sexe, etc.) ou intra-opérateur, c'est-à-dire l'état physique et mental de l'opérateur (fatigue, stress, charge de travail, charge cognitive, état émotionnel, etc.) ; puis les variabilités de l'entreprise, ayant des origines normales, inhérentes au type de travail effectué, ou incidentelles. Les variabilités normales peuvent être contrôlées, par exemple avec une variation périodique du volume de production, ou des variations liées au produit, aux matières. Elles peuvent également bien entendu être aléatoires en cas d'incident technique, de variation de l'environnement ou de la demande du client, par exemple. Qu'elles soient contrôlées ou non, les variabilités peuvent être plus ou moins attendues, voire s'imposer brutalement à l'opérateur.

La notion de régulation est directement liée à celle de variabilité. La régulation est « une correction du fonctionnement d'un processus qui est fonction de l'écart entre le résultat à atteindre et celui effectivement obtenu » (Leplat, 2006). Une régulation est donc très différente d'une règle, qui par définition fixe une prescription ; elle permet la gestion des situations de travail réelles. L'opérateur régule soit en réaction à une variation (régulation rétroactive), soit en anticipant une variation (régulation proactive) par rapport à l'organisation temporelle, aux contraintes de l'environnement physique, aux informations sur le processus de fabrication, à l'état du système, etc. (De Terssac & Christol, 1982).

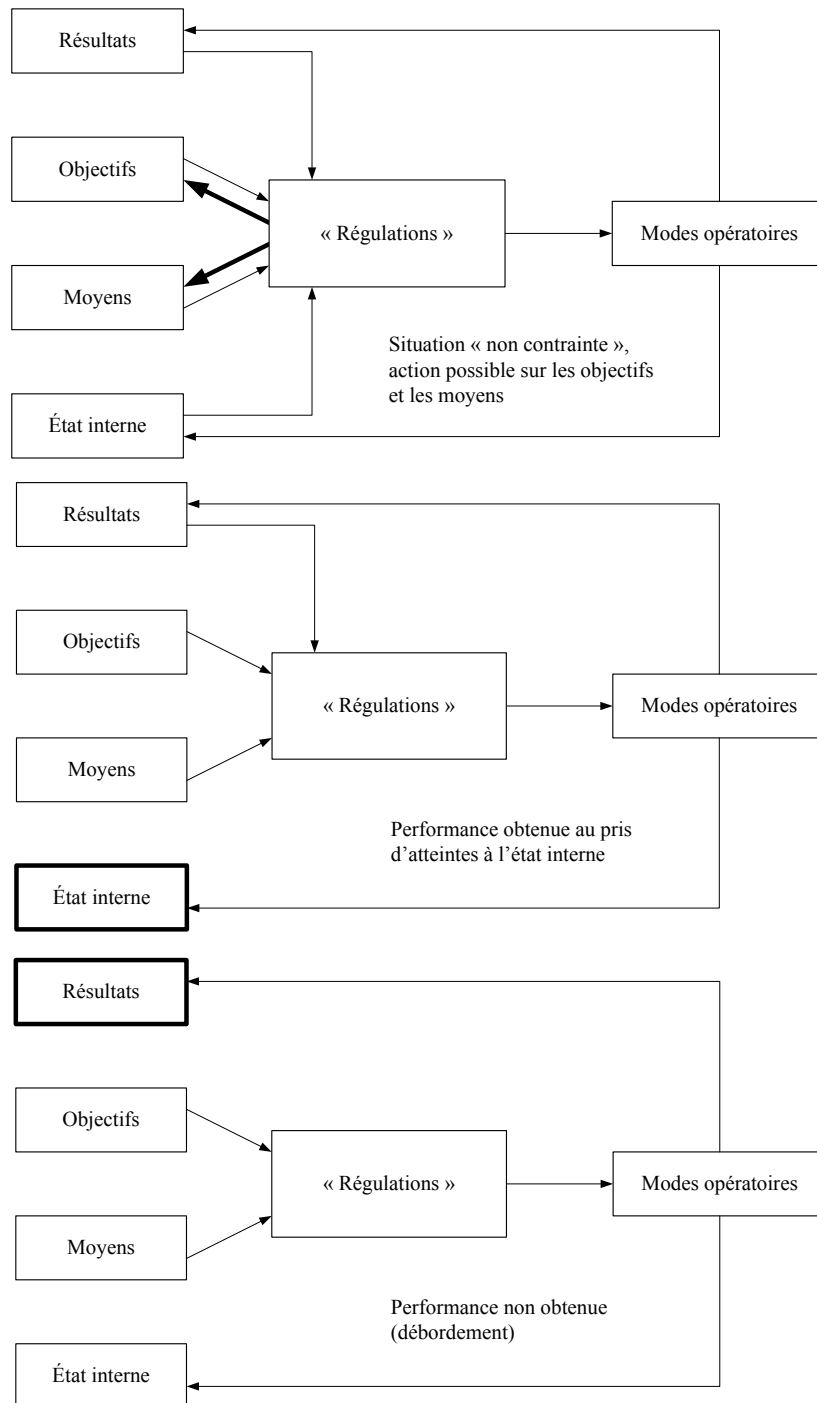


Figure 8 : Régulations de l'homme au travail (Guerin, Laville, Daniellou, Duraffourg, & Kerguelen, 1991)

Nous retiendrons que l'opérateur, par son activité, permet la régulation du système de travail. La régulation est déterminante dans l'accomplissement de tâches complexes.

Dans les sections suivantes, nous chercherons à expliquer les processus cognitifs permettant cette régulation. Pour cela, nous présenterons un modèle faisant le meilleur compromis possible entre représentativité de l'activité mentale et usage du modèle pour la conception de systèmes cobotiques. Un laboratoire étudie déjà la modélisation de la cognition humaine, dans le contexte de la conduite automobile, depuis plus de 20 ans : l'IFSTTAR. Nous nous appuyerons sur ses travaux.

2.1.2 Socle théorique : modèle du conducteur automobile

L'opérateur, comme le conducteur automobile, réalise des tâches complexes, dans un environnement dynamique. En fonction de déterminants externes (l'environnement routier, la voiture, etc. pour le conducteur ; l'outil, la pièce, l'atelier, etc. pour l'opérateur) et internes (l'état psychophysique, les capacités physiques, etc.), conducteur et opérateur régulent les variabilités pour atteindre un objectif (respectivement l'atteinte d'une destination et l'accomplissement d'une tâche industrielle).

L'IFSTTAR²³ réalise un travail d'ingénierie, il utilise une modélisation du conducteur automobile pour concevoir et évaluer des dispositifs d'aide à la conduite, à l'aide d'un outil de simulation cognitive appelé COSMODRIVE (Bellet, 1998; Bellet, Bailly, Mayenobe, & Georgeon, 2007). Le laboratoire LESCOT²⁴, qui fait partie de l'IFSTTAR, a d'ailleurs mené plusieurs travaux de thèse en ingénierie cognitive (Bornard, 2012; Paris, 2014), sur lesquels nous nous sommes appuyés.

Ici, nous utilisons donc les concepts, déjà repris par ce laboratoire sur la Figure 9, que sont les mémoires de travail et à long terme, la représentation (ou conscience) de la situation, les raisonnements, la perception de l'environnement et l'action sur lui (Bellet, Bailly-Asuni, Banet, & Mayenobe, 2009).

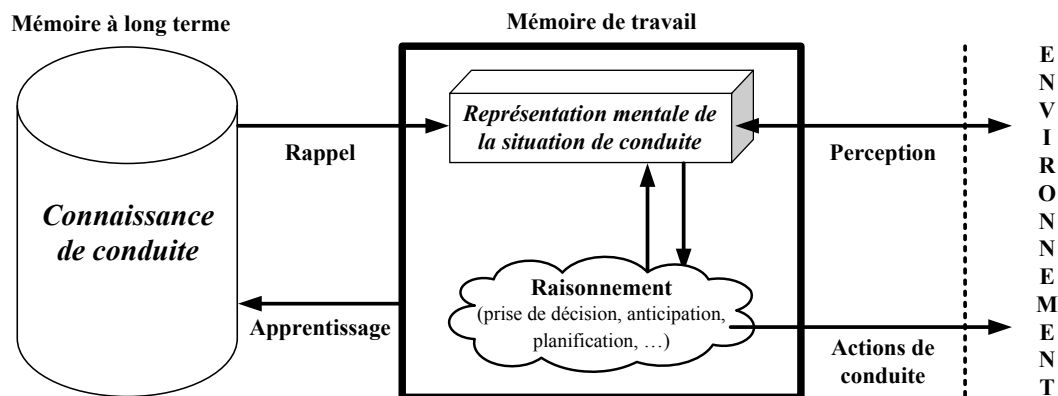


Figure 9 : Architecture élémentaire du système cognitif humain (Bellet, Bailly-Asuni, Banet, & Mayenobe, 2009)

Les raisonnements, mobilisant la mémoire de travail, sont les processus mentaux permettant l'action comme l'anticipation²⁵, la décision ou la planification. Le schéma précédent est affiné (cf. Figure 10) pour exprimer les processus automatiques et contrôlés, faire apparaître différentes boucles, et préciser la notion de représentation mentale.

La perception n'est pas simplement *bottom up*, elle dépend des buts poursuivis, des connaissances du sujet, et de ses ressources attentionnelles. C'est pourquoi elle est représentée ici sous forme de boucle (Bornard, 2012).

La mémoire à long terme contient à la fois les connaissances implicites, relatives à la mémoire procédurale, et les connaissances explicites, c'est-à-dire épisodiques et sémantiques. L'expertise d'un opérateur est répartie dans ces différents types de mémoire à long terme.

Bellet et al. (2009) considèrent la mémoire de travail comme une « mémoire opérationnelle », ou « mémoire de travail à long terme », c'est-à-dire comme une partie activée de la mémoire à long terme

²³ Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux.

²⁴ Laboratoire Ergonomie et Sciences Cognitives pour les Transports.

²⁵ Pour plus de détails sur l'anticipation, voir la thèse sur l'anticipation des pilotes d'avions (Lini, 2013).

(Richard, 1990), qui sert les besoins concrets de l'activité en cours (Zintchenko, 1966). Elle dépasse donc la vision largement répandue de la mémoire de travail de Baddeley (1986). En mémoire de travail, l'opérateur mobilise des connaissances issues de sa mémoire à long terme en fonction de sa perception de l'environnement et des objectifs qu'il s'est fixés.

Dans le modèle développé par l'IFSTTAR, les représentations mentales sont centrales, s'inspirant des notions d'image mentale, d'image opérante, et des représentations partielles et enrichies (Ochanine, 1977). Nous retiendrons ici l'idée principale selon laquelle les représentations mentales ne sont pas le reflet de la réalité, mais des déformations fonctionnelles de la réalité, interconnectées avec toutes les connaissances relatives à cette représentation (objectifs, situations, actions, concepts, retours d'expérience, etc.). Nous nous contenterons d'une vision plus simple et linéaire (Chalandon, 2007) de la conscience de la situation, puisque la manipulation en est facilitée et que ce concept n'est pas central. Ainsi, Endsley (1995) définit la conscience de la situation comme *the perception of elements in the environment within a volume of time and space, the comprehension of their meaning, and the projection of their status in the near future* (librement traduit : « la perception d'éléments de l'environnement dans un temps et un espace donnés, leur compréhension, et la projection sur leur statut dans un futur proche »).

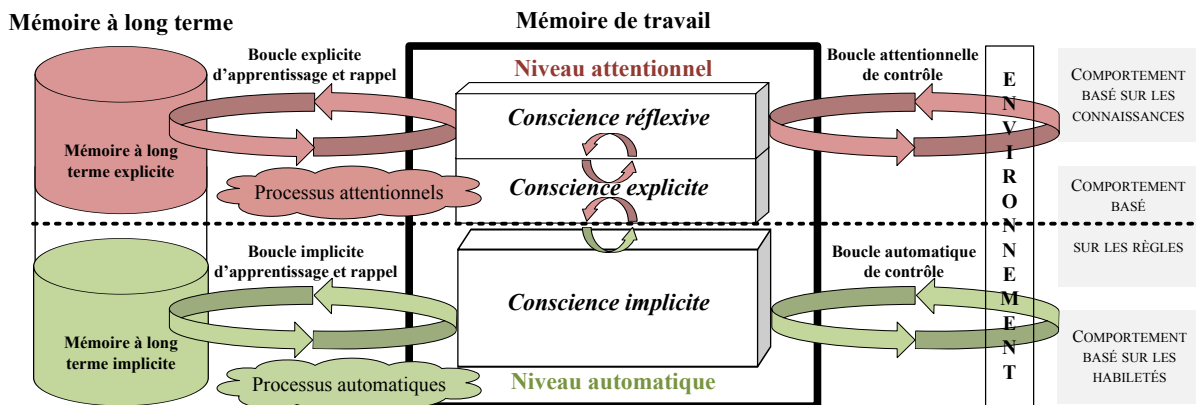


Figure 10 : Boucles de contrôle et boucles d'apprentissage via l'émergence et l'immersion (Bellet, Bailly-Asuni, Banet, & Mayenobe, 2009)

Le modèle cognitif illustré Figure 10 présente deux types de processus cognitifs : les processus automatiques et les processus contrôlés, sous forme de boucles implicites et explicites. Ils sont opposés et complémentaires (Kahneman, 2011). Le contrôle automatique (Système 1 chez Kahneman) est rapide, intuitif, et inconscient. À l'inverse, le contrôle attentionnel (Système 2) est lent, réfléchi et conscient. Aussi, les processus automatiques consomment peu de ressources cognitives²⁶, quand les processus contrôlés en requièrent une grande quantité.

La gestion dynamique humaine a également été décrite par Rasmussen (1983) et son célèbre modèle des comportements basés sur les habiletés, les règles ou les connaissances (cf. Figure 11). À noter, comme Rasmussen le précise, qu'il n'existe pas réellement trois niveaux discrets de raisonnement, mais un continuum entre le comportement « automatique » et le raisonnement complexe basé sur les connaissances.

²⁶ Pour plus de détail sur les ressources cognitives et leur gestion, voir la thèse de Bey (2016).

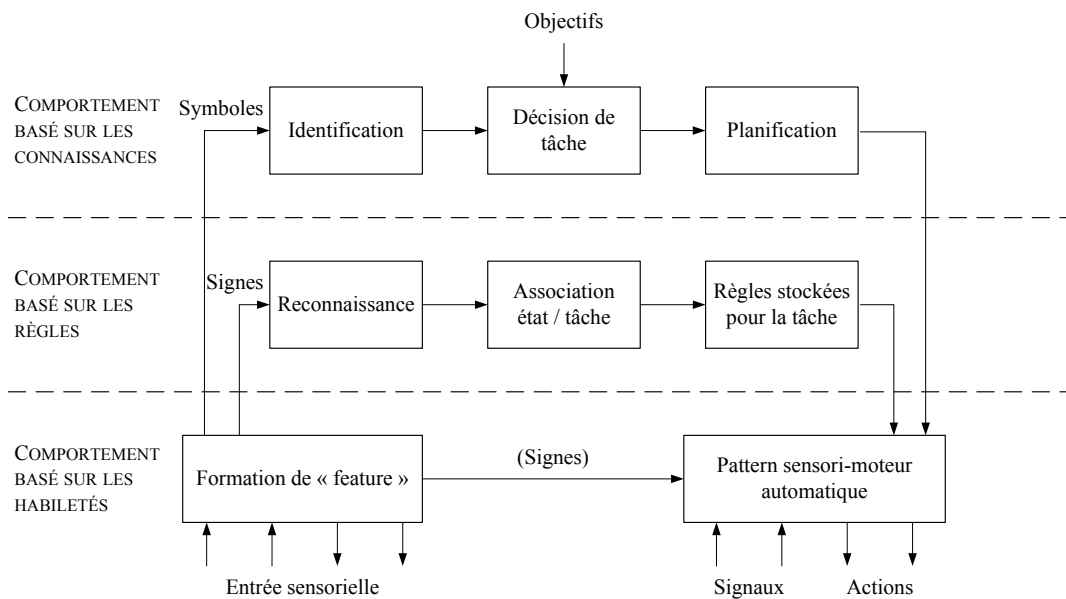


Figure 11 : Illustration simplifiée des trois niveaux de performance d'un opérateur expert (Rasmussen, 1983)

Ranney (1994) propose un tableau qui croise les niveaux de Rasmussen et ceux de Michon (1979) pour décrire les niveaux de contrôle d'un conducteur automobile. Michon distingue lui aussi trois niveaux :

- les processus stratégiques, au plus haut niveau, relatifs à la détermination d'un but ;
- les processus tactiques, relatifs à la situation ;
- les processus opérationnels, au plus bas niveau, relatifs à l'action.

Le tableau original ayant comme champ d'application celui de la conduite automobile, nous en avons adapté le contenu pour qu'il soit plus générique dans le Tableau 3.

	Stratégique (<i>objectif</i>)	Tactique (<i>situation</i>)	Opérationnel (<i>action</i>)
Knowledge Level <i>Savoir (nouvelle procédure)</i>	Définition d'un nouvel objectif	Gestion d'une situation nouvelle	Réalisation d'une action nouvelle
Rule Level <i>Savoir-faire explicite (procédure familière)</i>	Définition d'un objectif familier	Gestion d'une situation familière	Réalisation d'une action familière
Skill Level <i>Savoir-faire implicite (procédure automatique)</i>	Définition automatique d'un objectif	Gestion automatique d'une situation	Réalisation automatique d'une action

Tableau 3 : Croisement des niveaux identifiés par Rasmussen (1983) et Michon (1979), adapté de Ranney (1994)

Ce croisement des niveaux de raisonnement (Stratégique-Tactique-Opératoire) avec les niveaux de contrôle (Knowledge-Rule-Skill) permet de caractériser les régulations de l'homme au travail. Pour concevoir des systèmes homme-robot-tâche, nous veillerons donc bien à analyser les processus explicites et implicites des opérateurs. Nous ne nous contenterons pas du niveau opérationnel, plus facile d'accès, mais chercherons à étudier la situation (niveau tactique) et l'objectif (niveau stratégique) qui ont induit un comportement.

Le LESCOT étudie la cognition humaine dans une situation de conduite automobile ; or, cette thèse concerne l'homme en situation de travail, collaborant avec un robot. Couramment, on distingue une voiture d'un robot dans l'industrie en raison de leur différente finalité. La voiture augmente les capacités de déplacement de l'homme, alors que le robot dans l'industrie augmente l'opérateur dans la réalisation d'une tâche.

Cette distinction entre robots et voitures est discutable, d'autant plus que ces dernières disposent désormais de capteurs, de processeurs (qui jouent un rôle d'autant plus important que l'autonomie du véhicule est grande), et d'actionneurs leur permettant de se mouvoir dans leur environnement. En cela, elles répondent à notre définition de robot (cf. 1.1.1). Les évolutions de la voiture en font donc un robot mobile de transport de personnes, et l'étude du conducteur de voiture se rapproche de celle de l'opérateur collaborant avec un robot dans l'industrie.

2.1.3 Adaptation du modèle du conducteur pour la cobotique industrielle

Le modèle du conducteur correspond à notre problématique d'activité de travail, de l'étude du rôle de la cognition dans la régulation. Visant une utilisation pour l'ingénierie en cobotique, nous avons tout de même cherché à en proposer une représentation simplifiée, y apportant une légère retouche (cf. Figure 12). En effet, le positionnement de la conscience de la situation dans la mémoire de travail ne nous convient pas tout à fait puisque nous les voyons comme distribués, à la fois cognitifs et métacognitifs, émergeant de l'activité mentale (Chalandon, 2007). Nous avons également souhaité explicitement évoquer l'état physiologique (stress, fatigue, etc.) et émotionnel, puisqu'ils sont à prendre en compte dans la conception.

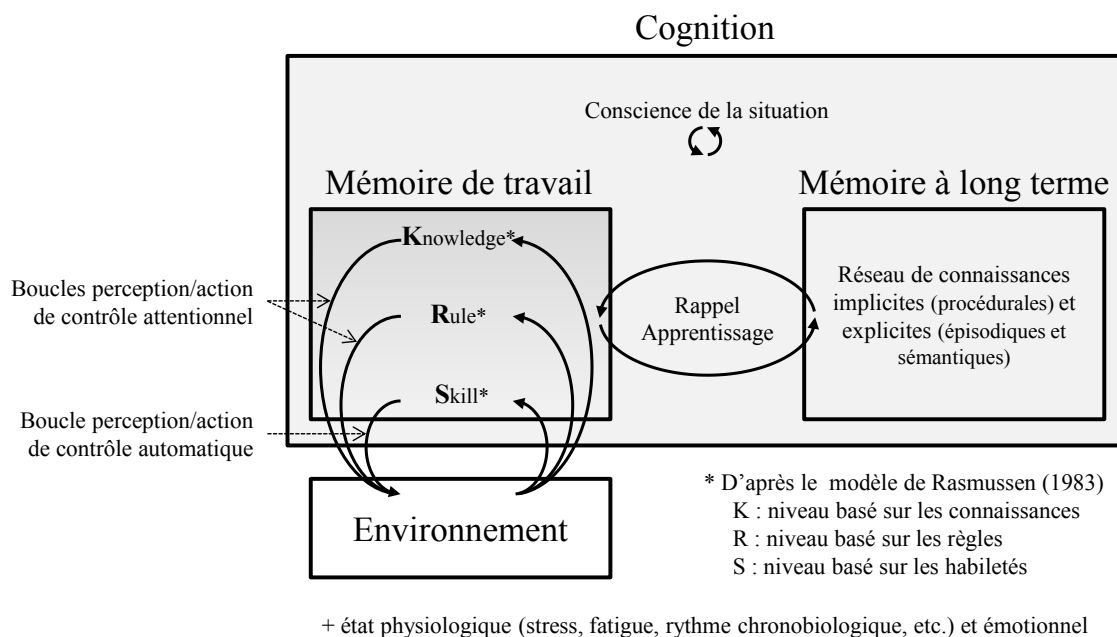


Figure 12 : Simplification du modèle de la cognition du LESCOT

Ce modèle de la cognition de l'homme au travail nous permettra de modéliser l'homme dans sa collaboration avec un robot comme agent de régulation des variabilités (cf. 2.4.3).

2.1.4 L'erreur humaine

Jusqu'ici, nous avons considéré l'homme comme agent de fiabilité, régulant les variabilités par son activité. Pourtant, dans l'industrie, il est souvent perçu comme une source potentielle d'erreur.

L'erreur humaine est une décision inappropriée, indésirable, qui réduit ou peut réduire la sécurité et/ou la performance du système (Sander & McCormick, 1993). À partir de son modèle *Skill-Rule-Knowledge*, Rasmussen (1983) propose trois catégories d'erreur humaine :

- les erreurs basées sur les compétences, qui résultent d'une mauvaise interprétation ou compréhension ;
- les erreurs basées sur les règles, qui proviennent de l'application d'une règle à la mauvaise situation, ou au mauvais moment ;
- les erreurs basées sur les connaissances, qui apparaissent lorsque l'environnement ne présente pas assez d'éléments pour prendre une décision adaptée basée sur les connaissances de l'opérateur.

De façon plus précise, Reason (1990) introduit une taxonomie de l'erreur humaine, également basée sur le modèle de Rasmussen. Dans les erreurs inconscientes (basées sur le savoir-faire implicite), elle distingue les méprises et les oublis²⁷ et, dans les erreurs conscientes (basées sur les règles et connaissances, donc explicites), les fautes basées sur les règles ou sur les connaissances et les violations (cf. Figure 13).

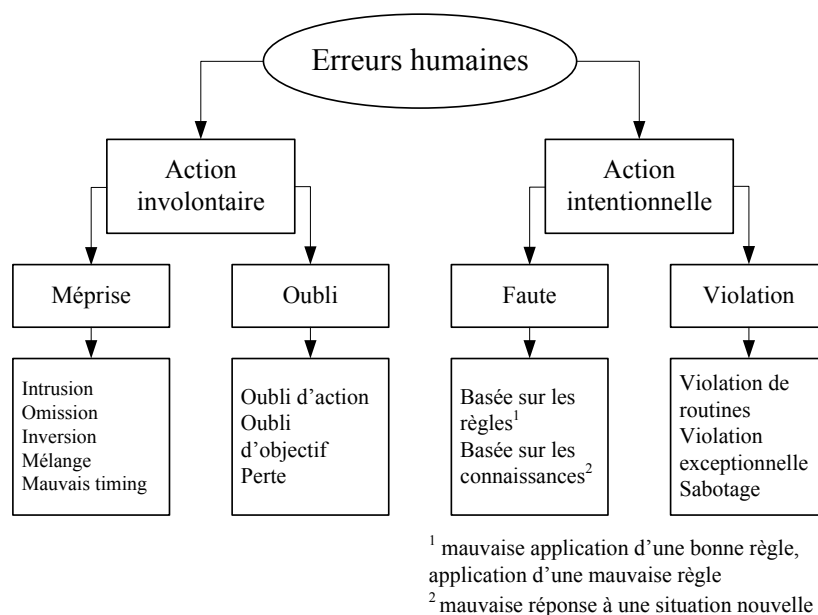


Figure 13 : Typologie de l'erreur humaine (Reason, 1990)

L'erreur humaine a parfois des conséquences désastreuses. De nombreux concepteurs ont tendance à la considérer comme un mal que les opérateurs contractent inévitablement en situation de travail (Rouse & Rouse, 1983). Il existe toutefois un autre point de vue, selon lequel l'erreur résulte d'une incompatibilité entre les capacités de l'opérateur et les contraintes de la tâche et de l'environnement. Autrement dit, l'erreur humaine provient de l'impossibilité pour l'opérateur de faire face à une situation imprévue, de réguler (Neboit & Poyet, 1991).

²⁷ « Méprise » et « oubli » sont les traductions respectives de *slip* et *lapse*.

L'approche de l'erreur humaine comme une impossibilité de résoudre des contraintes internes et externes est partagée par Millot et al. (2015), qui ont adapté le modèle de l'erreur de Rasmussen (1997). Ils considèrent la marge de manœuvre de l'homme au travail comme centrale pour expliquer l'erreur. Cette liberté dépend du compromis entre :

- les objectifs de performance fixés par l'opérateur et/ou l'entreprise ;
- la charge de travail acceptable par l'opérateur ;
- les efforts entrepris pour préserver la sûreté de fonctionnement du système, l'environnement, et la santé des opérateurs.

Les contraintes et relâchements de ces composantes modifient le comportement de l'opérateur, dont l'activité est modifiée en conséquence, et il devient susceptible de commettre des erreurs mettant la production, voire sa propre sécurité, en péril (cf. Figure 14). Millot et al. (2015) précisent l'importance de la conscience de la situation²⁸ de l'homme voire du système technique. Une bonne conscience de la situation permet, dans l'idéal, d'éviter les erreurs, mais aussi de les détecter et de rétablir la situation.

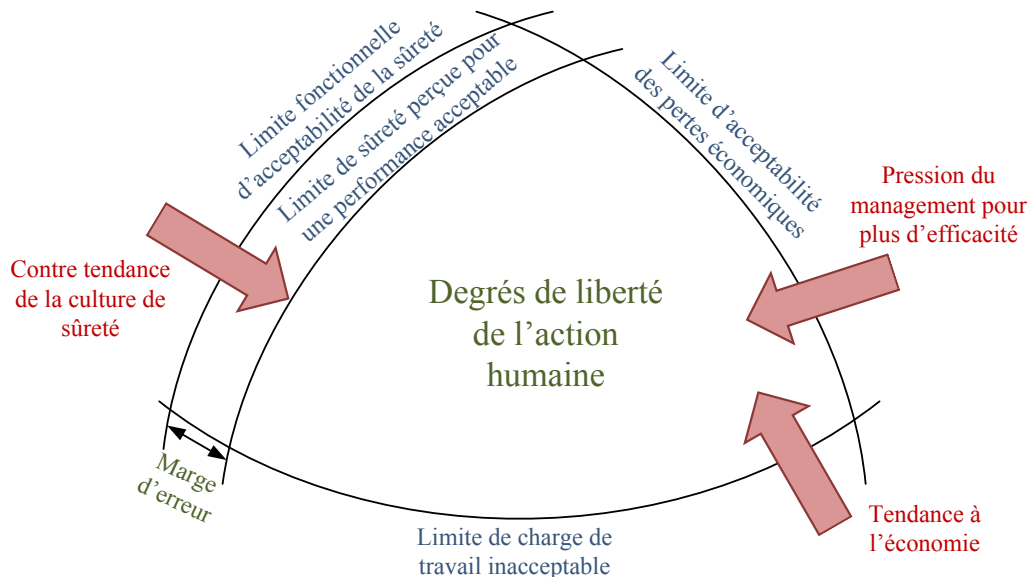


Figure 14 : Les compromis qui régissent l'action humaine, adapté de Rasmussen (1997) par Millot et al. (2015)

Dans la conception, nous nous concentrerons donc sur la marge de manœuvre laissée à l'opérateur et à sa conscience de la situation pour gérer les risques d'erreur.

Nous verrons dans la prochaine partie comment l'homme, en tant qu'agent de régulation, et le robot, dont le fonctionnement est expliqué dans la thèse de Bitonneau (2018), collaborent en interagissant pour réaliser une tâche commune.

²⁸ La conscience de la situation est déjà abordée au 2.1.2.

2.2 La collaboration homme-robot

2.2.1 Colocalisation, assistance, coopération et collaboration

En robotique industrielle, les termes « coopération » et « collaboration » sont utilisés pour nommer un type de robot (coopératif ou collaboratif) muni des dispositifs de sécurité suffisants pour partager son espace de travail avec l'homme. Ici, il nous semble important de préciser la notion de colocalisation, d'assistance, de coopération et de collaboration.

Étymologiquement, coopérer (*con operor*, « avec » et « travailler », « opérer ») et collaborer (*con laborare*, « avec » et « travailler », « labourer ») ont le même sens. Comme le précise Grosz (1996), la collaboration implique qu'il y ait un but en commun, elle va donc plus loin que la simple interaction (échange d'informations, d'énergie ou d'affects).

Weistroffer (2015) reprend dans sa thèse les définitions de Rogalski (1994), qui fait la distinction entre coopération et collaboration. Pour lui, la coopération implique d'atteindre un but commun en assignant à chaque participant des tâches différentes (et donc des sous-objectifs). La collaboration, quant à elle, atteint ce but commun grâce à une tâche commune entre les participants.

Plusieurs difficultés se dressent suite à ces définitions. D'une part, les notions de « but commun » et de « tâche commune » sont discutables. Chaque but et chaque tâche sont décomposables en sous-tâches et sous-buts, et plusieurs tâches/sous-tâches peuvent être simultanées. D'autre part, les agents sont susceptibles de passer d'un mode (coopération ou collaboration) à un autre très régulièrement, ce qui rend complexe la dénomination des activités de travail.

Pour simplifier, nous utiliserons ici indifféremment les termes *coopération*, *collaboration* et leurs dérivés, pour désigner le travail de plusieurs agents dans la réalisation d'une tâche commune (sous-tâche commune ou non), l'atteinte de buts communs (Terveen, 1995). 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 coopèrent, ils collaborent.

Cette définition tranche avec la définition classique de « robotique collaborative », qui correspond pour nous plutôt à la colocalisation (ou coprésence), c'est-à-dire au fait pour l'homme et le robot d'avoir un espace physique de travail commun dans lequel ils peuvent ou non collaborer.

Enfin, un moyen d'« assistance » est un dispositif qui aide l'opérateur cognitivement et/ou physiquement dans sa tâche. Un dispositif d'assistance n'a donc pas de but propre, il contribue à la réalisation des buts de l'opérateur en le soulageant physiquement ou cognitivement. Il se contente de l'assister dans la réalisation de ses objectifs. Récemment, une nouvelle famille de dispositifs entre le moyen d'assistance et le robot est apparue. Elle est dotée de buts propres puisqu'elle est programmable, mais elle a besoin de l'action de l'homme pour fonctionner. Un exemple de cette nouvelle famille est illustré Figure 15. Nous placerons tout de même ce nouveau type de dispositif dans les robots susceptibles de collaborer, et non dans les moyens de simple assistance.



Figure 15 : Exemple de robot d'assistance (RB3D, 2014)

2.2.2 La collaboration homme-robot

Ici sont présentées les visions de différents auteurs sur la coopération entre homme et robot.

Helms et al. (2002), dans une optique de robotique industrielle, schématisent quatre types de coopération, suivant l'action de l'homme et du robot ayant un but commun. Leur action peut être indépendante, synchronisée, simultanée sur la même pièce ou bien assistée et effectuant le même procédé sur la même pièce (cf. Figure 16).

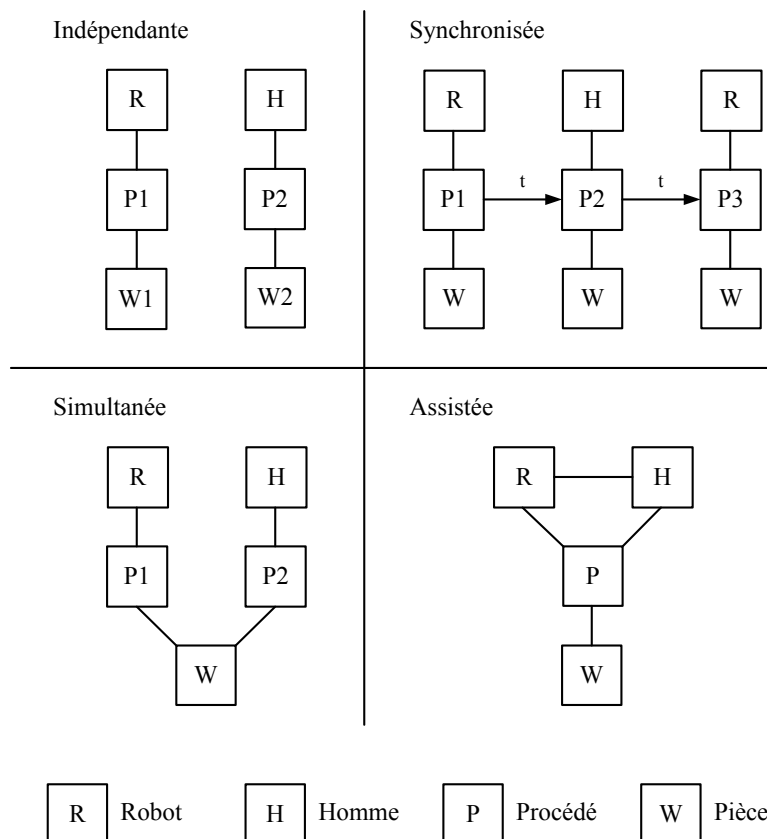


Figure 16 : Les différents modes de coopération selon Helms et al. (2002)

Schmidt (1991) propose trois formes de coopération, se basant plutôt sur le partage de la sous-tâche et l'expertise des agents. Il y a la collaboration :

- *augmentative* : les agents ont le même savoir-faire mais doivent être plusieurs pour absorber la charge de travail. (ex : deux banquiers au guichet) ;
- *debative* : les agents ont le même savoir-faire et réalisent une même tâche indivisible (ex : deux chirurgiens discutant d'un patient) ;
- *integrative* : les agents ont des savoir-faire différents et complémentaires, chacun réalise une sous-tâche de la même tâche principale.

Millot et Debernard (2007) ont représenté ces trois modes de coopération dans un tableau éclairant sur les différences entre modes (cf. Tableau 4).

		<i>Même savoir-faire</i>	<i>Savoir-faire différent</i>
<i>Tâches divisibles</i>	<i>Même sous-tâche</i>	Augmentative	Coopération impossible
	<i>Sous-tâche différente</i>	Coopération impossible	Integrative
<i>Tâches indivisibles</i>		Debative	Coopération impossible

Tableau 4 : Les types de collaboration selon le savoir-faire et le partage des tâches (Millot & Debernard, 2007)

Dans la coopération homme-machine, trois classes de capacités des agents (hommes ou machines) existent (Millot & Debernard, 2007) :

- le savoir-faire propre à l'agent ;
- le savoir-coopérer : gérer les objectifs (prioriser, organiser) et favoriser l'atteinte des objectifs des autres agents ;
- le besoin de coopérer (motivation à coopérer, connaissance de son savoir-faire, par exemple la capacité à réaliser la tâche en fonction de la charge de travail).

Boy (2002) propose trois modes d'interaction selon la compréhension mutuelle des agents. Pour le « mode supervision », un agent a l'autorité et l'autre ne prend aucune décision. Pour le « mode médiation », les agents ont un cadre commun de référence²⁹ qui leur permet d'interagir, bien qu'ils ne se comprennent pas de façon détaillée. Il peut également y avoir des agents intermédiaires qui facilitent l'interaction (affichage d'aide contextuelle par exemple). Enfin, pour le « mode compréhension mutuelle », chaque agent a une représentation mentale des autres agents ce qui leur permet d'interagir de façon très performante (ce que font généralement les hommes naturellement). Ces trois modes d'interaction sont utiles pour résoudre les problèmes de conflits dans les buts de haut niveau ou l'allocation des ressources, en établissant des règles de synchronisation (Boy, 2005).

Hoc (1998) décline la coopération suivant qu'elle soit passive (que plusieurs agents contribuent à un but commun sans activité coopérative) ou active (les agents ont besoin d'un « savoir coopérer » pour réaliser des activités coopératives, gérer des interférences dans les buts). La coopération active peut se faire à plusieurs niveaux : dans l'action (liée à l'exécution de la tâche, au niveau opérationnel), dans la

²⁹ Ce cadre commun de référence peut être assimilé au savoir coopérer de Millot et Debernard (2007).

planification (il faut pour cela une conscience partagée de la situation, des interactions pour gérer cette situation, au niveau tactique), et une coopération entre agents comme pairs (méta-coopération, membres d'une équipe, *human-like*, au niveau stratégique).

Pour des postes de travail, il est déterminant de bien maîtriser le niveau de coopération visé. Le premier niveau est suffisamment mature (gestion d'interférence, reconnaissance d'intention), le deuxième est partiellement atteignable (rôles adaptables/adaptatifs/mixtes³⁰, systèmes experts d'aide à la décision, etc.), mais le troisième est plus exigeant et reste futuriste dans l'industrie.

Certes, l'intelligence artificielle connaît une progression impressionnante ces dernières années. Des comportements de systèmes artificiels peuvent désormais sembler résulter de l'activité cognitive humaine. Notamment, la communication avec des artefacts dans différents domaines (chatbots, assistants personnels, thérapeutes virtuels, etc.) a atteint un degré de perfectionnement permettant de faire passer la machine pour un partenaire naturel. En ce sens, l'existence d'une équipe homme-robot similaire à un duo humain ne paraît pas futuriste.

Cette situation résulte néanmoins d'un simple processus d'analogie : faire « comme si » cela était humain tout en étant artificiel.

L'ensemble des efforts consentis à faire passer le fameux test de Turing (1950) à une IA en est la parfaite illustration. Le programme informatique ne comprend pas la discussion, mais il parvient à en donner l'illusion à l'homme. Cela permet à l'homme d'attribuer à la machine une intention de communication qu'il attribuerait à un autre humain. Dans ce cas, il est impossible pour la machine de traiter de ce pan entier de la linguistique et de son rôle dans la pensée. Mais il est nécessaire de rapporter cette nécessité cognitive pour expliquer la collaboration homme-machine. Cela permet de comprendre la place de l'analogie dans des processus à l'œuvre dans l'interface homme-machine ou l'immersion en réalité virtuelle (Claverie, 2017).

Ingénieurs et chercheurs développent aujourd'hui des algorithmes de plus en plus « autonomes », capables de résoudre des problèmes de plus en plus compliqués posés par l'homme. Cela offre des perspectives à une collaboration plus poussée, plus proches des niveaux stratégiques de Michon (1979) et du *knowledge-level* de Rasmussen (1983). Ce type de résolution de problème est du domaine de l'« IA faible ».

Pour former une équipe réellement *human-like*, qui collabore à haut-niveau, cette technologie n'est pas suffisante. La compréhension du sens, l'émotion, la conscience, l'autoapprentissage, l'inventivité, l'adaptation aux états mentaux du partenaire, ou la production d'intentions nouvelles par exemple, restent des défis majeurs dans la poursuite de ce que l'on appelle l'« IA forte ». Ici, la machine serait capable de « comprendre » ce qu'elle fait et d'adapter son comportement dans une co-construction de la tâche avec l'homme, en dépassant le statut d'outil, d'artefact, pour devenir un agent réellement partenaire.

Les propositions de cette section ne sont pas concurrentes mais complémentaires pour décrire les modes de collaboration. Les approches qui étudient la relation homme-système technique se focalisent sur le savoir des agents, en particulier leur savoir-coopérer. Savoir coopérer implique de connaître les objectifs des autres agents, mais aussi leurs capacités à atteindre ces objectifs. Cette conscience réciproque est déterminante pour une collaboration poussée. L'approche robotique permet de

³⁰ La répartition dynamique des rôles est détaillée dans une section suivante (cf. 2.3.3).

visualiser la forme de la collaboration, c'est-à-dire sa temporalité et sa localisation (au niveau de la pièce, du procédé, etc.).

Pour collaborer, les agents ont besoin d'interagir sur leurs objectifs et/ou sur la façon de les atteindre. La prochaine section présente une revue des moyens d'interaction homme-robot.

2.2.3 Les moyens d'interaction homme-robot dans l'industrie

Selon Marc et Picard (2002), « une interaction est 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 ».

Après avoir abordé la façon dont l'homme et le robot peuvent collaborer, il est question ici des moyens d'interagir. Bien souvent, l'interaction est abordée par la notion d'interface, qui est l'ensemble des moyens techniques prévus pour l'interaction. Pour un robot industriel, il s'agit classiquement d'un *teach pendant* (moyen de programmation en ligne³¹) ou d'un ordinateur. L'interface est incluse dans le système robot puisque composée de dispositifs techniques reliés directement au robot. En revanche, l'interaction homme-robot n'est comprise ni dans l'homme, ni dans le robot. Elle concerne l'échange réel entre agents, que ce soit à travers l'interface prévue par les concepteurs ou non. À noter également que l'interface n'est pas figée, elle est susceptible d'évoluer dans le temps.

Ici, nous désignerons sous l'appellation « moyens d'interaction » les moyens possibles pour l'homme de capter des informations du robot et d'agir sur lui et inversement, pour le robot de capter des informations de l'homme et d'agir sur lui.

Pour l'homme, le recueil d'informations passe principalement par la vue, l'ouïe et le toucher (Goodrich & Schultz, 2007). Les interfaces utilisant ces médias peuvent être composées d'éléments physiques (« classiques » - comme des boutons ou joysticks -, de déplacement d'objets, de manipulation directe ou de télémanipulation), de surfaces tactiles, de moyens de capture du mouvement, d'affichages visuels, de production de sons, voire d'interfaces cerveau/machine (Gergondet, et al., 2011) ou BCI (Brain Computer Interface), cf. Tableau 5.

³¹ En robotique industrielle, après avoir installé et mis en service le robot, la programmation sur les lignes de production est appelée « programmation en ligne ». Elle s'oppose à la « programmation hors ligne » qui est effectuée à l'écart du processus de production.

Physiques	Moyens classiques : bouton, molette, joystick, souris, manette, pointeur, etc. Robot manipulable. Réplique du robot ou de son effecteur manipulable avec ou sans retour haptique.
Tactiles	Surface tactile, écran tactile, bouton tactile. Peau du robot tactile.
De capture du mouvement de l'opérateur	Objets repérés dans l'espace : combinaisons de capteurs, de récepteurs. <i>Eyetracking</i> , <i>handtracking</i> (<i>leap motion</i> , gants), capture du bras ou du corps entier (Kinect).
Visuels	Écran, lunettes de réalité virtuelle ou augmentée, « cave » (salle d'immersion en réalité virtuelle), compteur, voyant, etc.
Sonores	Retransmission des données sonores, commande vocale (mots-clés, phrases), indication sonore (alarme, orientation).
Autres	Interface cerveau-ordinateur (BCI), électromyogramme (EMG), électroencéphalogramme (EEG), montres connectées, etc.

Tableau 5 : Les moyens d'interaction homme-robot

2.2.4 Technologies-clés pour l'industrie

Certains des moyens évoqués ci-dessus ont récemment fait leur apparition dans l'industrie, et méritent d'être évoqués plus en détail.

Avec la démocratisation des téléphones et tablettes tactiles, les simples surfaces, écrans ou boutons tactiles sont de plus en plus présents dans les usines. Par exemple, les *teach pendant* sont de plus en plus constitués d'écrans tactiles. D'autres perspectives sont par ailleurs étudiées pour une interaction plus naturelle avec un robot, en l'équipant d'une « peau tactile » (Mittendorfer & Cheng, 2011).

La manipulation distante, ou télémanipulation, n'est pas un thème de recherche nouveau, il a largement été traité pour des applications dans le nucléaire depuis des décennies (Garrec, et al., 2010; Tornil, 2006; Stone, 2000). Cependant, ce type de dispositif est encore rare dans l'industrie en général. Le principe de fonctionnement est la manipulation par l'homme d'une réplique du robot pour rester à distance des milieux hostiles, ou changer l'échelle de la manipulation : la diminuer pour de grands déplacements, l'augmenter pour des opérations nécessitant une grande précision comme cela est pratiqué en chirurgie (Gosselin, Bidard, & Brisset, Design of a High Fidelity Haptic Device for Telesurgery, 2005). Pour ce type d'interaction, il est difficile de se passer des retours haptiques (retours d'effort) sur l'exécution de la tâche. Cela se fait généralement par l'intermédiaire de « bras haptiques » ou de « gants haptiques » (Gonzalez, Gosselin, & Batcha, 2013; Gosselin & Andriot, 2011). La norme NF EN ISO 9241-2 (2011) classe les dispositifs à retour tactile et à retour de force dans la catégorie « haptique » (cf Tableau 6). Elle propose également une liste de critères pour différencier et éventuellement choisir un dispositif haptique en fonction du besoin.

Dispositifs tactiles	Dispositif vibrant, tenu à la main (manette de jeu par exemple) ou non (bipper, téléphone, gilets, ceintures) Dispositif d’affichage à picots (clavier braille par exemple) Dispositifs d’affichage à cisaillement Dispositifs thermiques et électriques
Dispositifs à retour de force	Dispositifs haptiques à bouton (retour de force 1D) Dispositifs de jeu qui assurent un retour de force (type joystick haptique, ou volant/pédales) Dispositifs haptiques à point, souvent représenté physiquement par une poignée (3 degrés de liberté) Dispositifs haptiques à stylet (6 degrés de liberté) Dispositifs haptiques à main (gant haptique) Souris à retour d’effort

Tableau 6 : Les dispositifs haptiques selon la norme ISO 9241-2 (2011)

Les normes en robotique industrielle ont récemment évolué (cf. 3.1.3.2). Elles autorisent désormais la présence d’un opérateur dans l’espace de travail du robot en fonctionnement. Cette évolution a permis le développement d’un nouveau moyen d’interaction homme-robot : la manipulation directe. Ainsi, pour aider au déplacement d’objets, pour assister l’homme dans la manipulation d’outils ou pour programmer le robot, des applications de ce type ont vu le jour dans l’industrie. Le robot doit alors non seulement satisfaire aux exigences en termes de sécurité (vitesses maximales, capteurs de présence, etc.), mais aussi être facile à utiliser. Pour cela, il est doté de capteurs de force sur une poignée spécifique (comme illustré sur la Figure 17) ou bien dans toutes ses articulations. Il est alors qualifié de cobot³². Des exemples de solutions pour la manipulation de grands objets ont été développés par Kosuge et Hirata (2004) ou Dumora et al. (2013).



Figure 17 : Opérateur manipulant une poignée en bout de robot (MRK-Systeme, 2017)

On peut également piloter un robot sans le toucher, avec notamment le *motion capture*, qui numérise les mouvements de l’opérateur avec ou sans capteurs/récepteurs sur le corps humain. Ici, nous faisons

³² Pour rappel, un cobot est un robot ayant les dispositifs de sécurité (propriétés mécaniques ou électroniques) suffisants pour pouvoir fonctionner dans le même espace de travail que l’homme.

la distinction entre la « détection de l'homme pour des raisons de sécurité » et la « détection de l'homme pour collaborer ou pour mieux collaborer ». Nous sommes particulièrement intéressés par le deuxième cas de figure.

Les études pour interagir par les gestes sont nombreuses (Yamane, Anderson, & Hodgins, 2010; Field, Stirling, Naghdy, & Pan, 2009; Taralle, Paljic, Manitsaris, Grenier, & Guettier, 2015), mais ce type d'interaction est encore peu fréquent sur les postes de travail. L'interaction sans contact est également possible en utilisant la communication orale.

Le langage naturel entre hommes et robots n'est pour le moment pas utilisé dans les usines, bien que les technologies de reconnaissance et de synthèse vocale soient de plus en plus matures (Hannun, et al., 2014). Les perspectives à court terme sont plutôt autour de la communication orale avec des mots-clés.

Les moyens de réalité virtuelle, augmentée et mixte se répandent sur les sites industriels. La réalité virtuelle immerge un utilisateur dans un environnement virtuel. La réalité augmentée affiche des éléments virtuels sur une scène réelle, à l'aide de lunettes ou de smartphones/tablettes tactiles. La réalité mixte se situe entre les deux. L'environnement est constitué d'un mélange d'éléments réels et virtuels. Ni la partie virtuelle ni la partie réelle ne prévaut.

Pour la robotique, la réalité virtuelle est souvent utilisée pour valider les configurations d'une installation lors de la conception (Fuchs, Moreau, & Tisseau, 2006). Weistroffer, dans sa thèse (2015), est allé plus loin en immergeant des opérateurs et en évaluant la différence de ressenti entre proximité réelle et simulée avec un robot. Ainsi, il a montré l'intérêt d'immerger l'opérateur dans son futur poste afin d'en anticiper l'acceptation³³. Cependant, à notre connaissance, aucune application industrielle n'utilise encore la réalité virtuelle pour interagir avec un robot en production.

La réalité augmentée semble présenter plus d'opportunités pour l'interaction homme-robot, comme en témoignent certains travaux conduits pour améliorer la collaboration avec un robot (Michalos, Karagiannis, Makris, Tokçalar, & Chryssolouris, 2016; Andersson, et al., 2016; Green, Billingham, Chen, & Chase, 2008; Fang, Ong, & Nee, 2012), bien que ce type d'application tarde encore à émerger.

Avec le développement des moyens d'interaction et de l'autonomie des robots³⁴, les applications de collaboration se multiplient également. La plupart des travaux sur la conception de systèmes homme-machine cherchent à déterminer le « degré d'automatisation » ou « degré d'autonomie » adapté aux contraintes de la tâche. La partie suivante définit les notions d'automatisation et d'autonomie. Puis elle justifie l'utilisation de rôles de l'homme et du robot plutôt que d'attribuer au système un « niveau d'automatisation ».

2.3 Les rôles dans la collaboration

2.3.1 Automatisation et autonomie

2.3.1.1 Définitions

Dans l'industrie, système autonome et système automatisé sont des expressions abusivement utilisées pour désigner des systèmes fonctionnant sans opérateur humain (Yanco & Drury, 2004; Goodrich & Olsen, 2003). D'une part, aucun système ne fonctionne tout à fait sans homme (Dekker & Woods,

³³ De Santis et al. (2008) avaient déjà évalué de cette manière l'acceptabilité d'un manipulateur pour fauteuil roulant.

³⁴ L'autonomie des robots est plus largement traitée dans la thèse de David Bitonneau.

2002), au moins pour les programmer ; d'autre part, les notions d'autonomie et d'automatisation n'ont pas le même sens.

Un rapport de l'ACT³⁵ rend compte de l'accord des 28 nations de l'Alliance atlantique pour souligner cette différence (NATO Allied Command Transformation, 2014) : « *the difference between autonomy and automation is that autonomous systems optimise behaviour in a goal-directed manner in unforeseen situations while automatic systems are fully pre-programmed and act predictably and independently of the situation and benefit for success* ». Librement traduit, la différence entre l'autonomie et l'automatisation est que les systèmes autonomes optimisent leur comportement pour atteindre un objectif dans des situations imprévues, tandis que les systèmes automatisés (ou automatiques) sont complètement préprogrammés et agissent de façon prévisible et indépendante de la situation et des résultats vis-à-vis de l'objectif.

L'autonomie est définie par Chatila (2014) comme la capacité à s'autogouverner, à mettre en œuvre des régulations face à des situations nouvelles pour atteindre des objectifs haut-niveau sans aide extérieure. Un robot autonome est donc un robot régulateur, résilient.

Un procédé automatique est dépourvu de conscience, sans réelle prise de décision. Il est réalisé en fonction d'un ensemble de règles fixées et préétablies. Les notions d'autonomie et d'automatisation sont donc opposées, l'une ayant des caractéristiques d'adaptation et de gestion de l'imprévisible, et l'autre de réalisation d'actions strictement prédéterminées.

Par ailleurs, aucune de ces deux notions ne décrit l'intervention humaine dans la tâche. Par exemple, un robot industriel ayant un comportement automatisé peut avoir besoin d'un opérateur en permanence pour l'alimenter en pièces. À l'inverse, un robot ayant un comportement autonome peut « débattre » avec un opérateur sur la définition d'objectifs haut-niveau, ou lui proposer des tactiques à mettre en œuvre face à une situation nouvelle.

Pourtant, de nombreuses recherches sont conduites pour décrire ce qui est nommé « niveau d'autonomie » ou « niveau d'automatisation³⁶ », positionnant un curseur entre travail humain et travail robotique.

2.3.1.2 Niveaux d'automatisation et d'autonomie

La détermination d'une échelle d'« automatisation » (ou bien d'« autonomie »)³⁷ a depuis longtemps fait l'objet de nombreuses recherches (Rasmussen, 1979), portant toutes en réalité sur le degré de remplacement de l'activité humaine par l'action d'une machine, en indiquant des niveaux intermédiaires entre « automatisation totale » (ou « autonomie totale ») et « travail humain ».

Les premières échelles positionnant les « niveaux d'automatisation » sont unidimensionnelles. Sheridan et Verplank (1978) ont publié une classification du « niveau d'automatisation », largement utilisée encore aujourd'hui. Elle traite 3 dimensions de l'« automatisation » : les données d'entrée fournies par l'homme, les données d'entrée fournies par la machine, et la responsabilité de l'homme dans la décision (cf. Tableau 7).

Cette classification a été une source d'inspiration majeure pour la majorité de celles qui suivirent : celle d'Endsley et Kaber (1999), avec dix niveaux dont les rôles sont plus détaillés (cf. Tableau 7 : Les niveaux d'automatisation de Sheridan et Verplank), celle de Billings (1996), avec sept niveaux pour

³⁵ Allied Command Transformation, chargé des questions doctrinales et de transformation de l'OTAN.

³⁶ En anglais, il s'agit de « *level of autonomy* » ou « *level of automation* ».

³⁷ Dans cette section, automatisation et autonomie sont entre guillemets pour rappeler que leur usage ne correspond pas à la définition retenue pour la thèse. Entre guillemets, ils désignent le degré de remplacement de l'activité humaine par l'action d'une machine.

l'« automatisation » du pilotage d'avions, celle d'O'Hara et Higgins (2010) avec une adaptation au cas d'une centrale nucléaire, ou bien l'échelle de l'U.S Navy Office of Naval Research (cf. Tableau 8), cette fois désignée « niveaux d'autonomie » (Williams, 2008), y ressemblent fortement.

Haut	
10.	L'ordinateur décide de tout, est autonome, et ignore l'homme.
9.	L'ordinateur informe l'homme seulement s'il 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 7 : Les niveaux d'automatisation de Sheridan et Verplank (1978)

<i>Niveau d'automatisation</i>		<i>Surveillance</i>	<i>Génération</i>	<i>Sélection</i>	<i>Implémentation</i>
1.	<i>Contrôle manuel</i>	H	H	H	H
2.	<i>Support à l'action</i>	H/C	H	H	H/C
3.	<i>Batch processing</i>	H/C	H	H	C
4.	<i>Contrôle partagé</i>	H/C	H/C	H	H/C
5.	<i>Support de décision</i>	H/C	H/C	H	C
6.	<i>Décision mixte</i>	H/C	H/C	H/C	C
7.	<i>Système rigide</i>	H/C	C	H	C
8.	<i>Décision automatisée</i>	H/C	H/C	C	C
9.	<i>Supervision</i>	H/C	C	C	C
10.	<i>Automatisation totale</i>	C	C	C	C

*H = Homme, C = Ordinateur

Tableau 8 : Hiérarchie des niveaux d'automatisation de Endsley et Kaber (1999)

<i>Niveau</i>	<i>Nom</i>	<i>Description</i>
1	<i>Opéré par l'homme</i>	Toute l'activité du système résulte directement d'une initiative humaine. Le système n'a pas de contrôle autonome de son environnement, bien qu'il puisse disposer d'informations.
2	<i>Assisté par l'homme</i>	Le système peut réaliser une activité en parallèle des données fournies par l'homme, agissant pour augmenter la capacité humaine à réaliser la tâche souhaitée, mais n'a pas la capacité d'agir sans accompagner l'action de l'homme.
3	<i>Délégué par l'homme</i>	Le système peut avoir un contrôle limité sur l'activité qui lui est déléguée. Le niveau comprend par exemple le pilotage automatique, le contrôle du moteur, et d'autres automatisations "bas niveau".
4	<i>Supervisé par l'homme</i>	Le système peut réaliser une large variété d'activités déterminées par l'homme à haut niveau. Le système apporte suffisamment d'informations pour être compris par le superviseur humain et redirigé de façon appropriée si besoin. Il ne peut pas prendre d'initiatives.
5	<i>Initiative mixte</i>	L'homme et le système peuvent être à l'initiative de comportements basés sur leurs informations. Des dispositifs de régulation de l'autorité du système sont utilisés.
6	<i>Totalement automatisé</i>	Le système ne nécessite aucune intervention humaine pour réaliser une tâche quelles que soient les conditions de l'environnement.

Tableau 9 : Niveaux d'autonomie de l'US Navy Office of Naval Research (Williams, 2008)

Différentes propositions ont par la suite été faites pour prendre en compte les différentes étapes du traitement de l'information. Proud et al. (2003), par exemple, se sont basés sur le modèle « OODA³⁸ loop » (Boyd, 1987), pour réaliser une grille des « niveaux d'autonomie » en fonction des étapes de ce modèle (observation, orientation, décision, action).

Sur le même principe, Parasuraman et al. (2000) résument le traitement de l'information en quatre étapes : acquisition de l'information, analyse, décision, et implémentation de l'action (cf. Figure 18). Selon Miller et Parasuraman (2007), ce modèle peut être complété par la décomposition plus fine du traitement, ou en prenant en compte la dynamique de la tâche.

³⁸ Observe Orient Decide Act (observe, oriente, décide et agit).

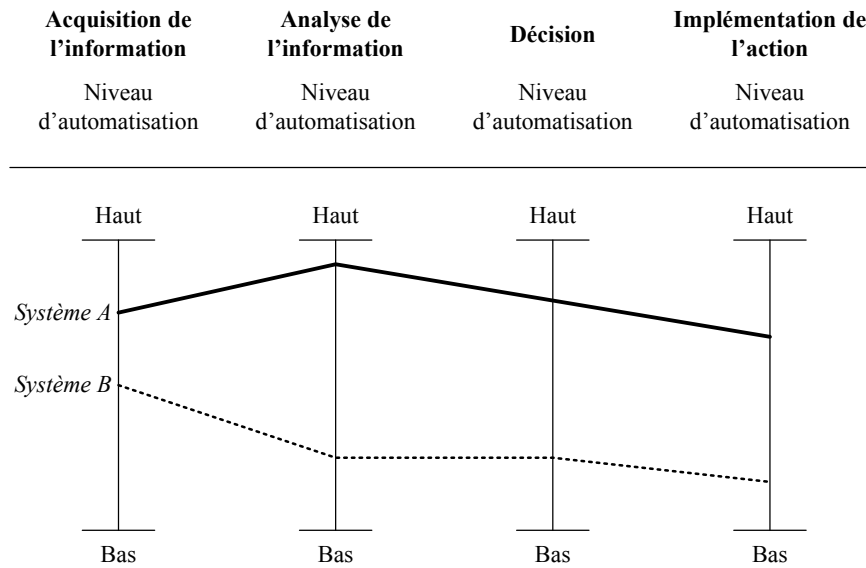


Figure 18 : Les niveaux d'automatisation suivant les étapes du traitement de l'information (Parasuraman, Sheridan, & Wickens, 2000)

On trouve dans la littérature, en particulier dans celle qui étudie les robots mobiles, différentes propositions d'axes suivant lesquels placer l'autonomie des systèmes techniques (NIAG, 2004; Goodrich & Schultz, 2007), comme le montrent les exemples du Tableau 10 et de la Figure 19.

<i>Niveau 1</i>	Système contrôlé à distance – Les réactions et comportements du système dépendent de données fournies par l'opérateur humain (non-autonome).
<i>Niveau 2</i>	Système automatique – Les réactions et comportement dépendent de fonctionnalités préfixées par l'homme (pré-programmé).
<i>Niveau 3</i>	Système autonome non-apprenant – Les comportements dépendent de fonctionnalités préfixées par l'homme ou d'un ensemble de règles préfixées (réactions et comportements dirigés par les buts).
<i>Niveau 4</i>	Système autonome apprenant à modifier ses règles – Les comportements dépendent d'un ensemble de règles qui peuvent être modifiées pour mieux satisfaire les buts, sans transgresser un ensemble de règles inviolables.

Tableau 10 : Niveaux d'autonomie du NIAG³⁹ (2004)

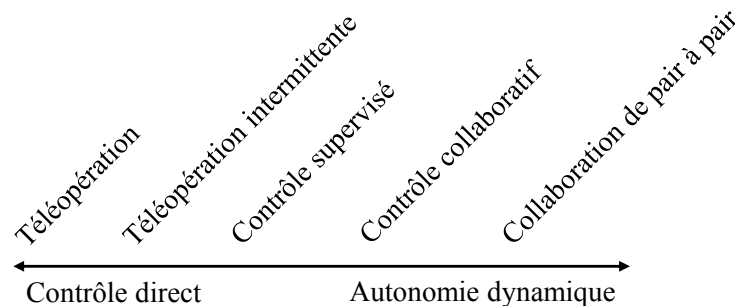


Figure 19 : Niveaux d'autonomie de Goodrich et Schultz (Goodrich & Schultz, 2007)

³⁹ NATO Industrial Advisory Group.

Toutes ces échelles proposent une répartition d'un découpage de la tâche en fonction de la décision. Des niveaux intermédiaires entre « l'homme prend toutes les décisions » et « le robot prend toutes les décisions » sont introduits.

2.3.1.3 Limites des « niveaux d'automatisation »

La première échelle de Sheridan et Verplank, sur laquelle se basent les autres, est réductrice (Sheridan, 1999). Elle ne tient compte que de trois dimensions de l'« automatisation » parmi une multitude. Malgré cela, elle a été par la suite considérée comme une échelle de « niveaux d'automatisation » utilisable telle quelle pour la conception. Sheridan confiera plus tard qu'aucune tentative d'échelle ne pourrait prendre en compte l'« automatisation » dans sa totalité, que cet objectif était trop ambitieux.

Cette recherche d'une échelle pour la conception, pour l'allocation des fonctions à l'homme ou à la machine revient aux approches de type *Men Are Better At-Machines Are Better At*⁴⁰, notamment décrites par Dekker et Woods (2002). Ces approches ne tiennent pas compte de la transformation des tâches lors d'une robotisation : certaines tâches sont ajoutées, d'autres éliminées. Elles empêchent les concepteurs de prévoir les fonctions émergentes, c'est-à-dire les fonctions qui apparaîtront lors de la réalisation de la tâche, les évolutions de la collaboration homme-robot. Elles tentent de fixer en amont les fonctions à accomplir.

De plus, elles incitent le concepteur à réduire la conception au positionnement du curseur entre travail humain et travail robotique ; or, répartir ainsi les fonctions est une entrave à la collaboration : on répartit entre « l'homme doit faire ceci » et « le robot doit faire cela » au lieu de s'intéresser à la façon dont homme et robot s'organisent pour collaborer, réguler les variabilités.

Récemment, le département américain de la défense qui travaille depuis des années sur l'autonomie a changé son fusil d'épaule, écartant la recherche d'une échelle de « niveaux d'autonomie » des systèmes techniques pour plusieurs raisons (US Department of Defense, 2012) :

- ils ne sont pas utiles dans le processus de conception ;
- ils se focalisent trop sur la technologie au lieu de se focaliser sur la collaboration homme-ordinateur, sur les besoins et contraintes dynamiques de la tâche ;
- ils sont souvent dévoyés et utilisés comme des niveaux d'autonomie discrets, alors que l'autonomie est un continuum ;
- il est possible pour un système d'être à plus d'un niveau en même temps pour différentes fonctions.

Les propositions précédentes nous semblent réductrices pour traiter de la collaboration homme-robot. Elles reposent sur la décomposition des tâches en sous-tâches et fonctions (travail théorique), alors que notre approche repose sur la régulation des déterminants (travail réel) pour la réalisation d'une tâche complexe.

Nous n'utiliserons donc pas ces « niveaux d'automatisation » pour la conception, bien qu'ils aient eu le mérite d'initier un grand nombre d'études sur le sujet de la collaboration homme-machine (Pacaux, et al., 2011). Claverie et al. (2013) ont proposé une représentation suivant deux axes indépendants : l'un concernant l'implication de l'homme dans le système, nommé « dépendance », l'autre le caractère « fixé » ou « autoapprenant » du système robotique, c'est-à-dire son autonomie (cf. Figure 20). La représentation suivant ces deux axes nous semble mieux adaptée à la conception, puisque le positionnement de la réalisation de la tâche sur ce graphique dénotera de la complexité du système robotique du fait de son autonomie, et du rôle de l'opérateur dans la tâche.

⁴⁰ Les approches de type *Men Are Better At-Machines Are Better At* sont souvent abrégées MABA-MABA.

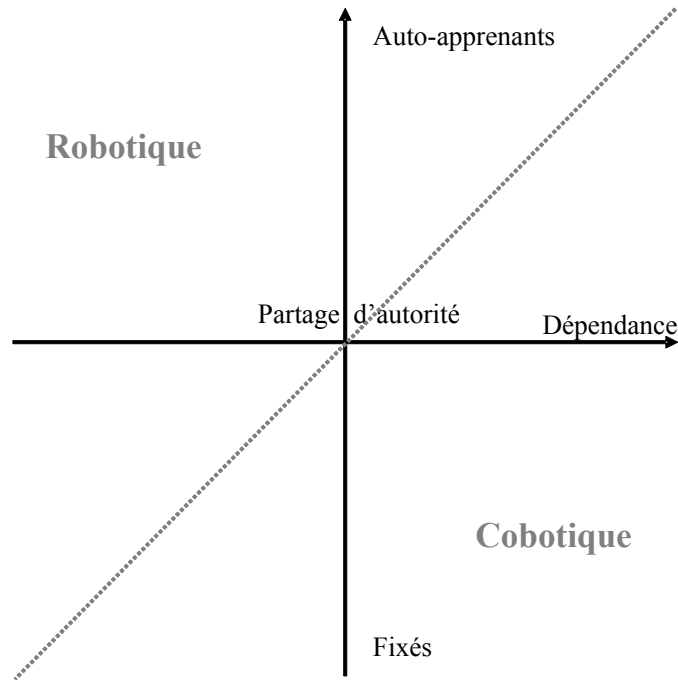


Figure 20 : Représentation factorielle des qualités et capacités des robots à partir de Claverie et al. (2013)

L'autonomie du système robotique, bien qu'elle impacte la collaboration entre homme et robot, n'est pas directement corrélée à l'implication de l'opérateur dans le système. Nous en avons déjà donné deux exemples. Le premier est celui d'un robot au comportement automatique qui a besoin d'un opérateur en permanence pour positionner les pièces. Le second est celui d'un robot autonome, « intelligent », qui peut « débattre » avec un opérateur sur la définition d'objectifs haut-niveau, ou lui proposer des tactiques à mettre en œuvre face à une situation nouvelle. Dans les deux cas, l'opérateur est fortement impliqué.

Nous évoquerons par la suite les rôles de l'homme et du robot plutôt que le « degré d'automatisation » ou « d'autonomie » du système robotique (cf. Figure 21).

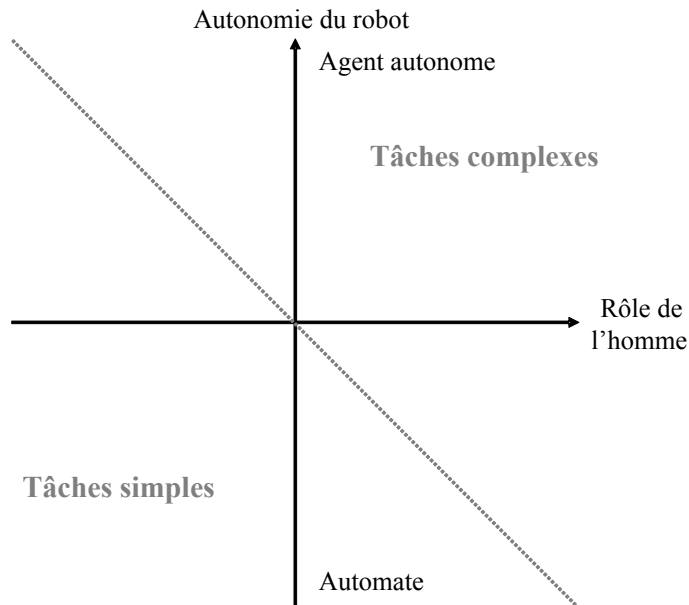


Figure 21 : Représentation du système homme-robot en fonction de l'autonomie du robot et du rôle de l'homme

2.3.2 Rôles respectifs de l'homme et du robot

Pour réaliser une tâche commune, l'opérateur et le robot peuvent avoir différents rôles. Scholtz (2002) se base sur les travaux en interaction homme-ordinateur (cf. Tableau 11) de Norman (1988) pour lister différents rôles possibles pour l'opérateur en interaction avec un robot mobile : superviseur, opérateur (agissant sur le hardware et/ou software), coéquipier, et coexistant.

1. Formulation du but (haut niveau).
2. Formulation de l'intention.
3. Spécification de l'action.
4. Exécution de l'action.
5. Perception de l'état du système.
6. Interprétation de l'état du système.
7. Évaluation du résultat de l'action (pour éventuellement enchaîner sur la suivante).

Tableau 11 : Modèle des sept étages de l'interaction homme-ordinateur (Norman, 1988)

Il existe toutefois d'autres rôles possibles, absents de la proposition de Scholtz. Le rôle d'opérateur de Scholtz peut être divisé pour différencier l'opérateur qui pilote totalement le robot de celui qui le guide pour réaliser une tâche pour laquelle le robot a des comportements propres (évitement d'obstacles par exemple), et de l'opérateur de maintenance qui vérifie et rectifie si besoin le software et/ou le hardware du système robot.

Lors des phases d'apprentissage, des rôles d'expert/novice⁴¹ peuvent s'instaurer entre homme et robot (Ogorodnikova, 2008). Par ailleurs, l'homme peut ponctuellement essayer d'entraver le robot, dans des cas non prévus par les concepteurs pour lesquels le programme est inadapté. De plus, de façon moins directe, le concepteur/programmeur du robot interagit avec lui. Ce rôle est aujourd'hui absent dans l'industrie, mais pourrait apparaître avec la robotique invasive.

⁴¹ Ici, l'expert est l'agent qui détient la connaissance et le novice l'agent qui ne la détient pas.

Le robot peut donc être :

- exécutant, lorsqu'il est piloté par l'homme et n'a pas de comportement propre ;
- guidé par l'homme (ou guide de l'homme) ;
- un coéquipier dans une relation que l'on pourrait qualifier de « pair à pair » ;
- qualifié de « cellule robotique » lorsque homme et robot « coexistent » ;
- supervisé ;
- objet pendant la maintenance, la conception/programmation ou lorsque l'homme tente de l'entraver.

Le rôle du robot dans la réalisation de la tâche dépend donc directement de celui de l'opérateur.

<i>Pilote</i>	L'opérateur pilote le robot (en local ou à distance) qui a peu ou aucune autonomie. Ce mode d'interaction est parfois utilisé pour apprendre une tâche au robot en ligne. Le robot est un exécutant.
<i>Guide</i>	L'opérateur guide le robot en permanence. Le robot a tout de même des capacités propres (ex : évitement d'obstacle, préhension). L'interaction se fait au niveau des habiletés. Le robot est guidé ⁴² .
<i>Coéquipier</i>	L'opérateur travaille avec le robot, interagissant à haut-niveau sur la situation et/ou les objectifs (niveaux tactiques et stratégiques). Le robot est également un coéquipier, il est un membre de l'équipe.
<i>Superviseur</i>	L'opérateur vérifie le travail du robot et peut lui donner des instructions. Le robot est supervisé.
<i>Coexistant</i>	L'opérateur se trouve dans la zone du robot sans interagir avec lui de manière volontaire, il doit néanmoins le comprendre un minimum pour se tenir en toute sécurité dans le même local, et pour une bonne productivité. Le robot est une cellule robotique classique.
<i>Agent de maintenance</i>	L'opérateur vérifie et rectifie si besoin le software et/ou le hardware du robot. Le robot est l'objet de la maintenance.
<i>Limiteur</i>	L'opérateur essaie d'entraver le robot (pour des cas non prévus à l'avance par exemple). Le robot est l'objet de l'entrave.
<i>Relation expert/novice</i>	L'opérateur et le robot sont respectivement novice et expert, ou l'inverse.
<i>Concepteur/programmeur</i>	L'opérateur est un expert en robotique qui conçoit, réalise et/ou modifie le software et/ou le hardware du robot. Le robot est l'objet de la conception, de la programmation.

Tableau 12 : Les rôles de l'homme dans la collaboration homme-robot

Les rôles de pilote, de guide, de coéquipier, de superviseur et de coexistant sont destinés à produire, en fonctionnement nominal. Les rôles d'agent de maintenance, de limiteur, d'expert/novice et de concepteur/programmeur servent à la gestion des phases de fonctionnement transitoires et dégradées, c'est-à-dire à la préparation et au maintien de la production. Nous cherchons ici à décrire la collaboration, et donc l'activité de production. Nous nous attarderons donc sur les rôles destinés au fonctionnement nominal.

Selon le rôle de l'homme, le système peut plus ou moins bien fonctionner seul. En effet, si le rôle de *coexistant* n'est pas assuré, le robot pourra continuer à fonctionner de la même façon. Si le rôle de *superviseur* n'est pas assuré, le robot pourra continuer son cycle automatique, mais la détection de

⁴² La différence entre agent guide et guidé est ténue. Nous intégrons donc également les cas de figure pour lesquels le robot guide et l'homme est guidé.

dysfonctionnement ou d'inefficacité anciennement faite par l'opérateur ne sera plus assumée, et il attendra en vain de nouvelles instructions à la fin de son cycle. 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, soit le robot aura de fortes chances de générer des incidents voire des accidents, soit il ne sera plus du tout opérationnel. Enfin, bien évidemment, si l'opérateur n'assume pas son rôle de *pilote*, le robot n'effectuera aucune action.

L'autonomie du robot est variable quel que soit le rôle. Par exemple, un robot exécutant, sans comportement propre autonome, peut proposer des stratégies à l'opérateur, ou bien simplement exécuter les ordres. En tant que guide (ou guidé), le robot peut auto-apprendre à mieux guider l'opérateur sur les trajectoires, ou bien simplement empêcher l'atteinte de certaines zones. Un robot coéquipier peut interagir sur les objectifs haut-niveau ou bien réaliser une sous-tâche complémentaire à celle de l'homme de façon automatique. Le robot supervisé, comme le robot classique, peut s'adapter en temps réel, auto-apprendre, ou exécuter un programme fixé.

Les rôles définis ci-dessus ne sont toutefois pas discrets et clairement délimités, ils s'inscrivent sur un continuum selon lequel l'homme est plus ou moins impliqué. Un système cobotique industriel présente rarement une configuration avec des rôles optimaux et fixés, puisque :

- la tâche est constituée en réalité de plusieurs sous-tâches et fonctions, nécessitant des configurations différentes ;
- en fonction des variabilités auxquelles le système est confronté, la réponse en termes de rôles peut différer⁴³ (Flemisch, et al., 2012).

Il est donc plus approprié d'étudier l'évolution des rôles de l'homme et du robot au cours de l'exécution de la tâche, de la marge de manœuvre dans la répartition des rôles. Kortenkamp et al. (1997) proposent par exemple un rôle intermédiaire pour le robot, appelé « *traded*⁴⁴ ». Le robot est supervisé en temps normal, mais peut être piloté par l'homme pour réaliser une sous-tâche complexe.

En se basant sur la représentation de Claverie et al. (2013), nous avons choisi deux axes pour décrire les rôles de l'homme et du robot. Le robot est décrit suivant son autonomie, alors que l'homme l'est suivant son rôle vis-à-vis du robot.

Pour la conception, cela peut permettre d'anticiper la façon dont la solution envisagée gèrera la complexité, sa résilience, puisque la capacité du système technique à réguler et la fonction assurée par l'homme sont explicites.

⁴³ Par exemple, la supervision du robot par l'opérateur pour les tâches en situations nominales, et un pilotage en temps réel en cas d'anomalie ou de situation exceptionnelle.

⁴⁴ On peut ici traduire *traded* par « changeant ».

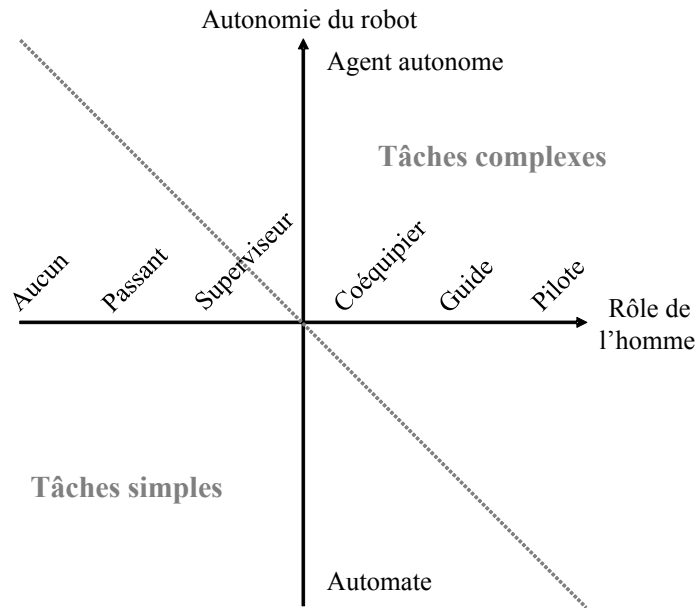


Figure 22 : Représentation du système homme-robot en fonction de l'autonomie du robot et du rôle détaillé de l'homme

2.3.3 Adaptabilité et adaptativité des rôles

Le couple de rôles homme-robot peut être redéfini pendant l'exécution de la tâche. Lorsque cela est à l'initiative de l'homme, on parle d'*adaptabilité* (Habib, Pacaux-Lemoine, & Millot, 2016), et lorsque cela est à l'initiative du robot, on parle d'*adaptativité*. Pour optimiser l'interaction homme-machine lors d'une supervision, Miller et Parasuraman (2007) posent le compromis entre une « automatisation adaptable » qui augmente la charge de travail et l'« automatisation adaptative » qui peut rendre le système imprévisible (cf. Figure 23).

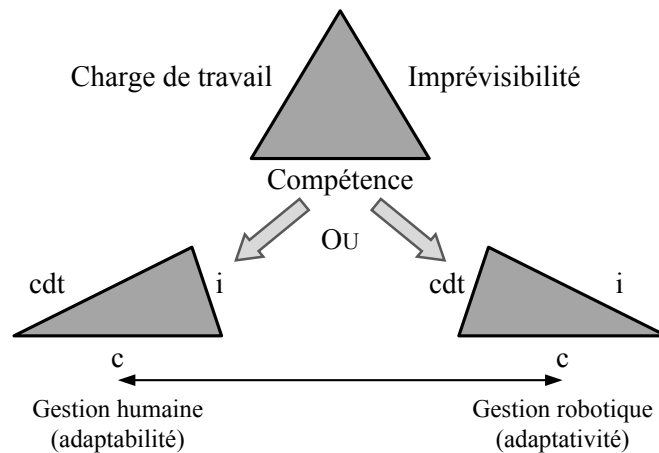


Figure 23 : Représentation du compromis entre compétence, charge de travail pour l'homme et imprévisibilité du système technique, adapté de Miller et Parasuraman (2007)

Miller et Parasuraman (2007) ont également développé un modèle qui permet à l'opérateur d'adapter son rôle et celui du robot en fonction du temps disponible, de la charge cognitive, de la criticité de la décision et de la confiance dans le système. Il en a la possibilité à travers une interface graphique qui lui propose une bibliothèque de moyens d'exécuter la tâche suivant plusieurs configurations, et un

gabarit pour en générer de nouvelles. Il faut cependant, dans cette approche, être vigilant vis-à-vis de la surcharge cognitive de l'opérateur, de sa sécurité et de l'efficacité globale, puisque l'on rajoute des tâches.

Quand il est possible pour l'homme et le robot d'ajuster leurs rôles respectifs, il s'agit d'un système à initiative mixte (Hearst, Allen, Guinn, & Horvitz, 1999). Pour une tâche donnée, il est possible d'évaluer la pertinence de ce type de fonctionnement vis-à-vis de rôles adaptables et adaptatifs, comme cela a par exemple été fait pour des applications de *Search and Rescue*⁴⁵ (Hardin & Goodrich, 2009).

Ainsi, lorsque les rôles sont variables, il peut être crucial de permettre à l'utilisateur de percevoir le rôle du système robot (Boy, 1998).

2.3.4 Apprentissage homme-robot

En « robotique classique », l'homme apprend au robot en le programmant, hors ligne à travers des logiciels de PHL (Programmation Hors Ligne) lors de la conception, et en ligne généralement en utilisant des *teach pendant* (Rahimi & Karwowski, 1990). La PHL est particulièrement adaptée pour la réalisation de tâches répétitives sur un gros volume de production. Ses principaux inconvénients sont son temps de réalisation et son coût (Pan, Polden, Larkin, Van Duin, & Norrish, 2012).

La programmation en ligne permet des adaptations fréquentes aux contraintes de production (Pan, Polden, Larkin, Van Duin, & Norrish, 2012). Cependant, les compétences en robotique des opérateurs experts dans la tâche limitent bien souvent les possibilités. Cet autre type de programmation a le désavantage de mobiliser des opérateurs et moyens de production sans pour autant produire. Ainsi, les contraintes liées à la situation de programmation en ligne (performance, sécurité, bruit, etc.) sont depuis longtemps constatées (Neboit & Poyet, 1991).

Bien que peu présente à l'heure actuelle en robotique industrielle, l'intelligence artificielle offre des perspectives pour l'apprentissage (voire l'auto-apprentissage) du robot en ligne, avec des algorithmes supervisés et non supervisés⁴⁶. Ce type de technologie peine à intégrer le monde industriel, probablement parce qu'il ne permet pas toujours de comprendre les décisions prises, ni de prévoir les comportements du robot. Or, dans l'industrie, la maîtrise des procédés de fabrication est un critère déterminant.

La cobotique ne permet pas de se passer de programmation hors ligne. Un minimum de programmation est nécessaire pour préparer le comportement du robot à la collaboration avec l'homme (en particulier du point de vue de la sécurité).

En revanche, quand l'approche « robotique classique » cherche à programmer en amont des réponses à toutes les situations, l'approche cobotique vise à laisser à l'homme et au robot la marge de manœuvre adéquate pour réaliser la tâche. Cela permet la réponse à des situations qui n'ont pas été anticipées par les concepteurs, de réguler les variabilités des situations de travail en production, l'apprentissage de la gestion de situations nouvelles, en évitant les aller-retours avec la programmation (Kleinpeter, 2015). Les régulations des variabilités ainsi que les erreurs d'un niveau acceptable favorisent l'apprentissage. C'est pourquoi un système est plus résilient s'il permet des régulations en ligne et un niveau d'erreur raisonnable (Sheridan, 1999).

⁴⁵ En français « recherche et sauvetage », localisation et secours aux personnes en situation de détresse.

⁴⁶ Les algorithmes supervisés apprennent grâce à la confirmation ou à la correction apportée par l'homme. Un robot apprenant de façon non supervisée a été programmé à l'avance par l'homme pour apprendre.

Ainsi, un premier type de système fonctionne sans intervention humaine, sauf pour des situations nouvelles ou inattendues, lors desquelles l'opérateur va apprendre au robot à y répondre. De cette manière, le robot saura y faire face lors des prochaines occurrences. Cela nécessite que l'opérateur connaisse (et apprenne à connaître encore mieux) à la fois les capacités et le fonctionnement du robot, mais aussi la réponse aux différentes situations de travail se présentant au cours de la tâche. Cette *cobotique d'apprentissage* est particulièrement adaptée à des postes sur lesquels il y a une grande variabilité de situations de travail ou sur lesquels de nouvelles situations sont fréquentes.

D'autres systèmes, bien qu'ils permettent l'apprentissage du robot, nécessitent toujours l'intervention de l'homme et des interactions en production. Cette *cobotique de production* permet à l'homme et au robot de collaborer pour gérer la complexité des situations nominales. Le robot peut lui aussi apprendre sur l'opérateur qui le pilote, afin de s'adapter à sa morphologie, à ses tactiques pour la réalisation de la tâche, voire à son état psycho-physiologique. L'opérateur apprend du robot pour mieux coopérer avec lui, et ainsi mieux connaître ses capacités, ses limites, les possibilités qu'il offre pour l'augmenter physiquement et cognitivement. L'homme et le robot apprennent à coopérer, renforcent leur savoir-coopérer (cf. 2.2.2).

De façon plus générale, le système de travail doit bien souvent apprendre pour répondre aux situations réelles. Il y a trois stratégies pour maîtriser les écarts dus aux variabilités (Corbett, 1989) :

- l'exportation : on ajoute des étapes supplémentaires pour corriger les écarts (par exemple les étapes de contrôle et de retouche) ;
- l'incorporation : un nouveau type de problème implique une modification du programme (c'est la logique de la « robotique classique », le processus de production est un système fermé) ;
- la modification : le contrôle des écarts est de la responsabilité des agents de production, qui vérifient et corrigent les écarts par rapport au résultat souhaité.

La stratégie par modification dispose d'un programme initial moins détaillé. Ce programme constitue plus un guide qu'une planification, et la boucle pour corriger les écarts est courte. L'opérateur a besoin d'une bonne représentation de la situation et de la marge de manœuvre suffisante. La cobotique s'inscrit plutôt dans ce type d'approche, bien que les deux autres types d'ajustement ne soient pas à exclure dans le cas d'un système cobotique.

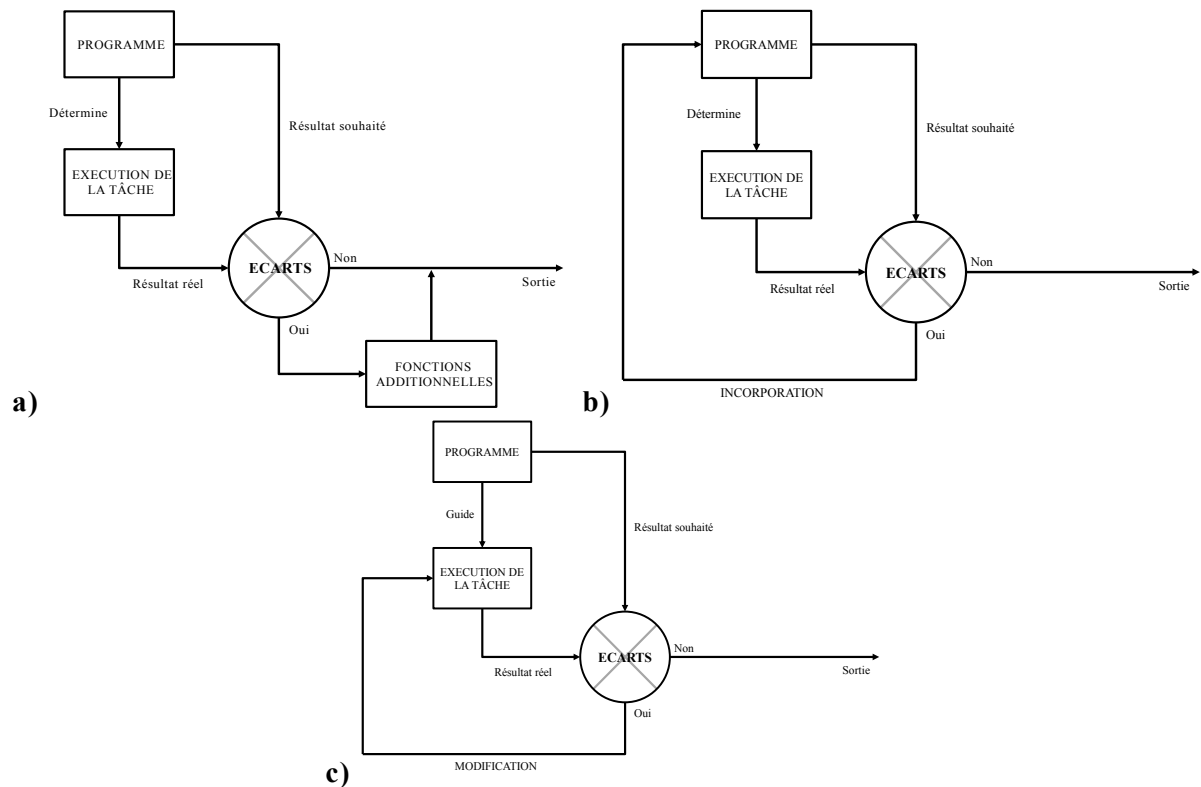


Figure 24 : Stratégies de maîtrise des écarts (Corbett, 1989), par exportation (a), incorporation (b), et modification (c)

Dans sa thèse sur les savoir-faire et gestes professionnels, Le Bellu (2011) décrit les trois formes principales de transmission des compétences professionnelles que sont la formation, le compagnonnage et les communautés de pratique (principe selon lequel l'apprentissage se fait dans un contexte social ; ainsi par exemple, il n'y a pas d'apprentissage sans engagement).

La formation, apprentissage sous l'angle de la conceptualisation, est à rapprocher de la programmation hors ligne du robot. Elle correspond au travail théorique. Le compagnonnage repose sur l'expérience, sur le travail réel. Il peut être rapproché de l'apprentissage en ligne pour la gestion de situations nouvelles pour l'homme et/ou le robot. Notre approche en cobotique prend en compte le travail théorique par la formation et la programmation hors ligne, mais aussi les évolutions du système en production, le « compagnonnage » homme-robot, pour réguler les variabilités, en laissant une marge de manœuvre aux agents du système.

Ayant présenté notre vision de l'homme au travail et des rôles de l'homme et du robot dans l'industrie, nous abordons dans la partie suivante plus globalement les systèmes cobotiques, au sein desquels homme et robot interagissent pour réaliser une tâche commune.

2.4 Les systèmes cobotiques

2.4.1 Définition

Rahimi et Karwowski (1990) introduisent les « *Human Robot Interaction System* », qui sont définis par cinq composantes :

- les éléments cognitifs et physiques requis par la tâche ;
- les caractéristiques cognitives et physiques de l'utilisateur ;

- les caractéristiques logicielles et matérielles du robot ;
- l'environnement ;
- une « bibliothèque » d'interactions.

Plus tard, Walther et Guhl (2014) dégagent trois axes pour décrire les interactions homme-robot : les éléments relatifs à la tâche, au robot, et enfin à l'utilisation du robot, c'est-à-dire relatifs à l'opérateur.

Comme cela a déjà été évoqué précédemment, nous allons développer la notion de système cobotique, défini comme un système au sein duquel homme et robot interagissent pour satisfaire un but commun. Au sein d'un système cobotique, le robot n'est pas systématiquement piloté par l'homme, puisqu'il peut disposer de ses propres capacités d'action et de décision. Plutôt que l'étude des interactions, nous avons préféré celle d'un système intégrant l'homme et le robot, ainsi que l'objectif qu'ils cherchent à atteindre. Sur un poste de travail, cet objectif est ici englobé dans la notion de tâche. La tâche dispose de propriétés immatérielles et matérielles, d'objectifs et d'un procédé physique de fabrication.

Dans cette partie, nous proposerons une modélisation du système cobotique. Cette modélisation d'un objet transdisciplinaire est le fruit d'un travail interdisciplinaire ; nous avons conjointement pris en compte l'homme, le robot et la tâche, à partir de compétences en cognitive, robotique et ergonomie. Le modèle a pour but d'obtenir une représentation immédiate de la structure et du fonctionnement du système cobotique, pour aider à sa conception. Enfin, nous chercherons à dresser une typologie de systèmes cobotiques.

2.4.2 Représentations du système homme-robot

La finalité de la modélisation est de décrire, d'expliquer et de prédire (Leplat, 2003). Notre principal objectif est de comprendre et d'expliquer la collaboration homme-robot dans la réalisation d'une tâche industrielle. La prédire est une opportunité qui pourra éventuellement émerger de l'utilisation du modèle, qui est par définition une réduction de la réalité.

Plusieurs schématisations simples de l'idée de collaboration homme-robot ont déjà été proposées. Spath et al. (2009), Surdilovic et Schreck (2010) ou, pour la téléopération, Sheridan (1992) ou Pina et al. (2008), ont cherché à illustrer le fonctionnement du système cobotique. Seulement, aucune de ces représentations ne prend en compte la tâche.

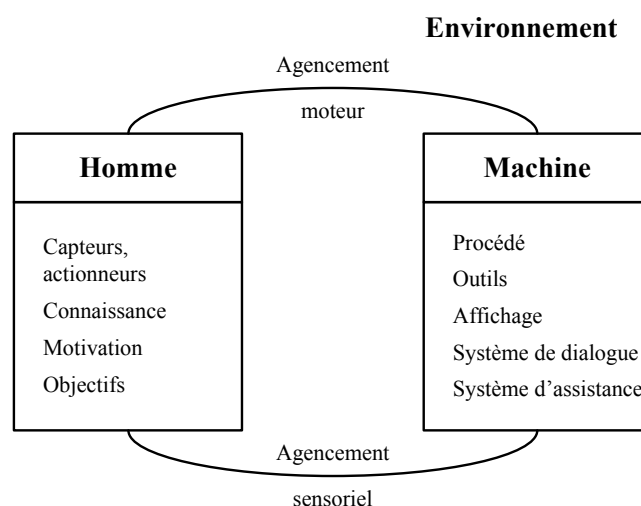


Figure 25 : Structure générale d'un système homme-machine (Spath, Braun, & Bauer, 2009)

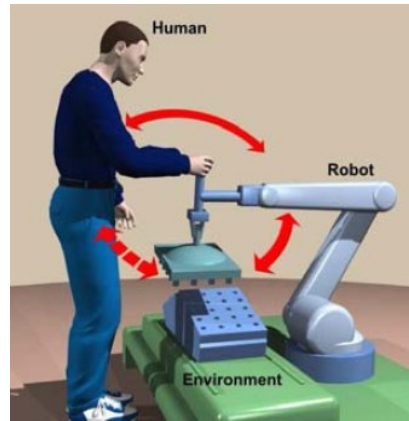


Figure 26 : Schéma de la collaboration homme-robot de Surdilovic et Schreck (2010)

Helms et al. (2002) font apparaître l'aspect matériel de la tâche (le procédé) en relation avec l'homme et le robot, mais les interactions sont résumées à des flux d'information et d'action, et l'environnement n'apparaît pas.

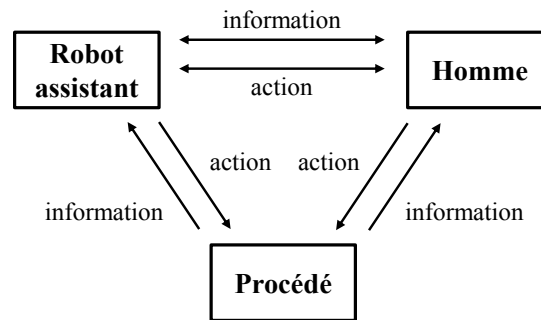


Figure 27 : Schéma de la collaboration homme-robot de Helms et al. (2002)

2.4.3 Modélisation du système cobotique

La cybernétique est introduite par Wiener (1948) comme la science générale de la régulation et des communications dans les systèmes naturels et artificiels. Elle est particulièrement adaptée à notre objet d'étude, puisque le système cobotique, constitué d'homme(s) et de technologie, régule en fonction de la tâche.

Suite à son introduction au milieu du XX^e siècle, la cybernétique a connu une seconde vague. Cette 2^e cybernétique se concentre sur l'évolution des systèmes, l'émergence de nouvelles propriétés, l'auto-organisation ou encore l'autopoïèse (Varela, 1996).

Le système cobotique transforme des *inputs* (la tâche et ses déterminants) en *outputs* (conséquences pour l'entreprise et le système). Ses objectifs sont :

- internes à l'opérateur, pour préserver sa santé, sa sécurité, pour son développement personnel ;
- internes au robot, pour préserver de son état ;
- externes au couple homme-robot⁴⁷.

⁴⁷ Il s'agit dans le cadre industriel d'objectifs pour l'entreprise, avec notamment la production et la pérennisation de la production (De Terssac & Christol, 1982).

La transformation des *inputs* produit des boucles de rétroaction permettant au système d'apprendre, de s'organiser, de voir émerger de nouvelles propriétés et de modifier la tâche (le procédé pour atteindre les objectifs), comme cela est illustré sur la Figure 28. Les systèmes cobotiques sont alors des autopoïétiques, puisqu'ils forment un réseau de processus qui peuvent régénérer, transformer ou détruire des éléments en interaction en son sein (Boy & McGovern Narkevicius, 2014).

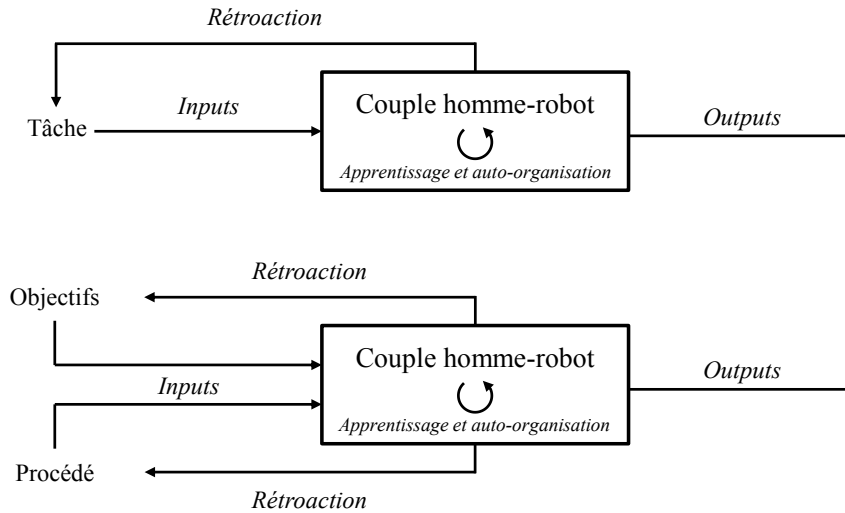


Figure 28 : Schéma cybernétique du système cobotique

L'homme et le robot sont deux sous-systèmes cybernétiques eux-mêmes auto-organisés. Pour mieux représenter les rôles, l'activité homme-robot, les perceptions/actions de l'homme et les boucles captation/action du robot, nous proposons sur la Figure 30 une schématisation reprenant les modèles de l'opérateur (cf. 2.1.1) et du robot (cf. Figure 29), et les principaux éléments des exemples ci-dessus.

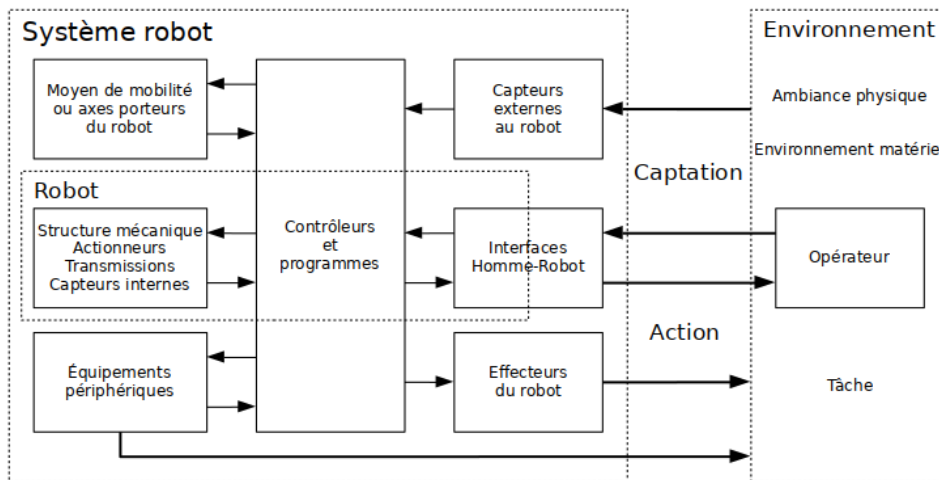


Figure 29 : Modèle du système robot (Bitonneau, 2018)

Les boucles perception/action de l'homme résultent de processus cognitifs complexes, très différentes des boucles captation/action du robot. L'activité humaine et ce que l'on pourrait qualifier d'activité robotique sont donc délibérément représentées avec des formes et des couleurs différentes.

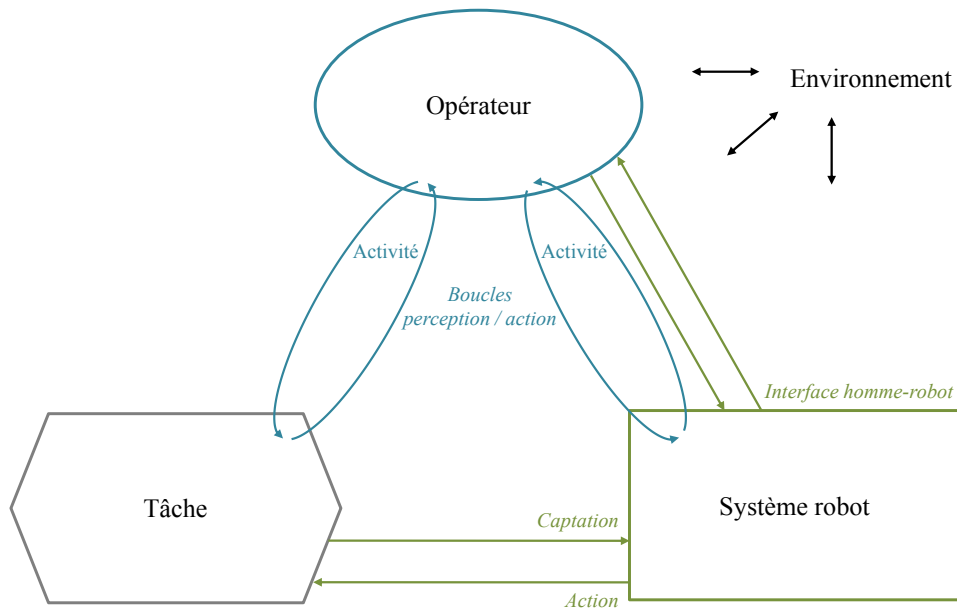


Figure 30 : Schéma général du système cobotique

Les trois entités (l'opérateur, le système robot et la tâche) ont des propriétés matérielles (physiques) et immatérielles. La composante matérielle de la tâche est constituée par le procédé de fabrication, la pièce, les outils et la documentation par exemple, quand sa composante immatérielle contient les objectifs du système, formellement définis ou pas. Le système robot est également dual⁴⁸ : une partie électromécanique, le *hardware* et une autre, le programme informatique et les données, le *software*. L'opérateur n'échappe pas à cette dualité matériel/immatériel, puisque l'homme, au travail ou non, est un corps et une cognition.

Les propriétés matérielles et immatérielles ne sont pas indépendantes. En effet, pour la tâche, l'objectif définit le procédé et le procédé définit l'objectif ; pour le système robot, le *software* dicte les actions au *hardware* et le *hardware* rend possible et conditionne le *software* ; enfin, pour l'opérateur, le corps et la cognition sont interdépendants dans ce qui est appelé par Varela (1996) la cognition incarnée. Le système cobotique complété avec ses propriétés matérielles et immatérielles est illustré à la Figure 31.

⁴⁸ Cela est détaillé dans la thèse de David Bitonneau (2018).

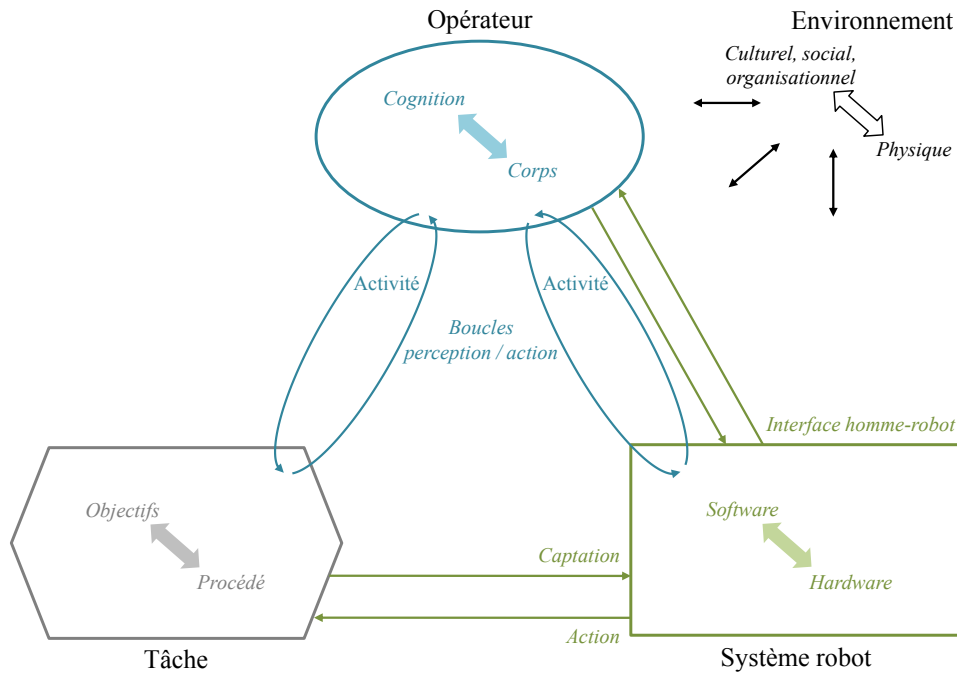


Figure 31 : Schéma des propriétés matérielles et immatérielles des sous-systèmes cobotiques, de la tâche et de l'environnement

La limite principale de cette proposition est la difficulté à faire apparaître plusieurs opérateurs ou plusieurs robots en tant qu'agents distincts. À partir de cette modélisation, nous proposons une typologie des systèmes cobotiques dans la section suivante.

2.4.4 Les types de systèmes cobotiques

2.4.4.1 Typologie des systèmes cobotiques

Suivant les normes des robots collaboratifs

Les classifications les plus souvent reprises par les industriels sont faites selon les contraintes de sécurité associées aux types de systèmes. Ainsi, la norme ISO 10218-2 (2011) décrit cinq types d'application (cf. Tableau 13) : la fenêtre de passage de la main, la fenêtre d'interface, l'espace de travail collaboratif, l'inspection et le robot guidé manuellement, qui correspondent au partage croissant de l'espace de travail, jusqu'au contact physique. Dans le guide du CETIM sur la robotique collaborative (Acoulon, 2013), le même type de classification des « îlots collaboratifs » est proposé, selon eux dans l'ordre croissant de l'interaction :

1. Ilot robotisé standard : pas d'espace de travail commun (cratérisation, ...) excepté pour les phases de maintenance et nettoyage où le robot est à l'arrêt ;
2. Ilot robotisé flexible : l'opérateur et le robot ne collaborent pas mais travaillent dans le même atelier (réduction des arrêts lors de la présence d'opérateurs) ;
3. Ilot robotisé collaboratif : interaction ponctuelle ou quasi permanente selon les besoins ;
4. Robot mobile : peut se déplacer de manière autonome dans l'atelier en présence d'opérateur(s), travaille sans intervention de l'opérateur ;
5. Cobot : absence d'autonomie du bras, déplacement uniquement par action de l'opérateur.

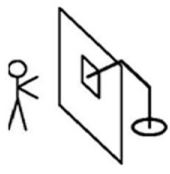
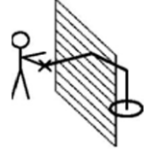
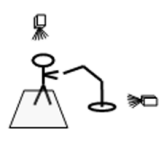
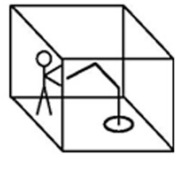
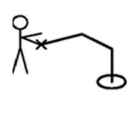
<i>Fenêtre de passage de la main</i>	<i>Fenêtre d'interface</i>	<i>Espace de travail coopératif</i>	<i>Inspection</i>	<i>Robot guidé manuellement</i>
				

Tableau 13 : Les différents types de cellules de robotique collaborative selon la norme ISO 10218-2 (2011)

Les limites de ces classifications résident dans la confusion entre interaction et partage d'espace de travail. En effet, il est tout à fait possible d'interagir très finement avec un robot à distance pour collaborer, et de partager un espace de travail avec un robot en ayant très peu d'interactions avec lui, sans collaborer. Nous nous intéressons à la collaboration et à l'interaction plutôt qu'au partage d'espace de travail et à la sécurité des opérateurs, nous n'adopterons donc pas ces classifications.

Du moyen d'assistance traditionnel au robot

D'autres classifications existent, positionnant la collaboration homme-robot entre la «robotique classique» et l'assistance passive (Figure 32 et Figure 33). Cette vision est intéressante puisqu'elle positionne la collaboration homme-robot entre le robot programmé hors ligne et le dispositif passif non programmable piloté par l'homme. Cependant, elle est réductrice pour traiter plus généralement de la cobotique (collaboration homme-robot) puisqu'elle ne traite que de l'assistance physique au geste, et pas du partage d'un objectif commun.

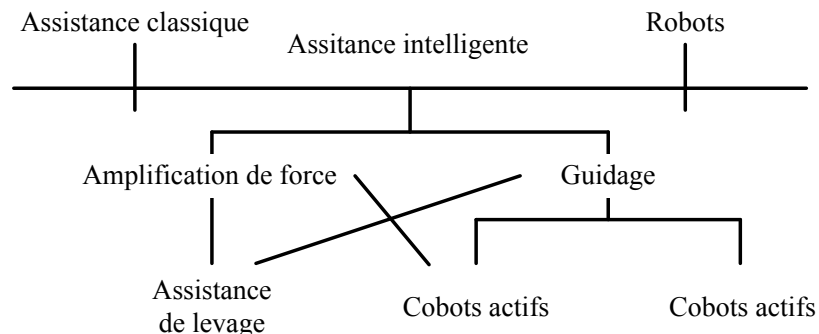


Figure 32 : Classification des « Intelligent Assist Devices » (IADs) (Akella, et al., 1999)



Figure 33 : Classification des systèmes hybrides entre les robots industriels et les manipulateurs passifs (Surdilovic & Schreck, 2010)

L'INRS⁴⁹ a une vision singulière de la cobotique. Il classe les dispositifs techniques selon leur application, médicale, personnelle ou industrielle (Atain Kouadio, Sghaier, & Picot, 2014). On retrouve les dispositifs techniques liés au système cobotique dans la catégorie « robot de service ». Pour les concevoir, nous préférons classer les systèmes cobotiques suivant leur type de fonctionnement que suivant leur domaine d'application.

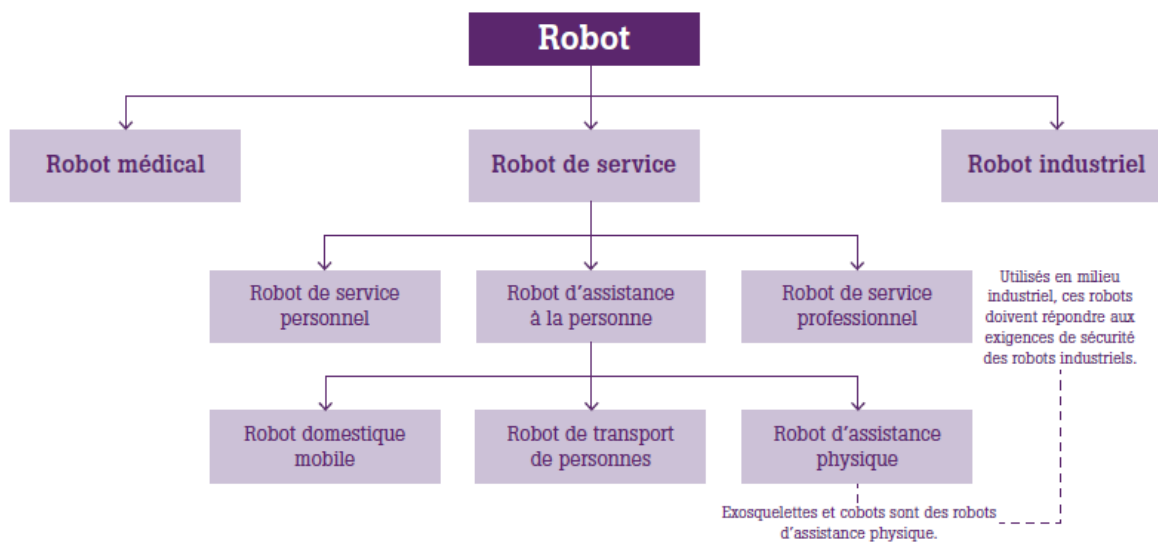


Figure 34 : Classification des robots de l'INRS (Atain Kouadio, Sghaier, & Picot, 2014)

Schraft et al. (2005) donnent plusieurs « degrés de liberté » à l'interaction homme-robot : la distance spatiale, la mobilité du robot et le partage de trajectoire (simultanées ou non, similaires ou non) pour réaliser la tâche (cf. Figure 35). Ces trois axes permettent de dégager une typologie de systèmes correspondant mieux à notre vision basée sur la collaboration. Ils distinguent la programmation hors ligne (correspondant à la « robotique classique »), la surveillance de procédé, la téléopération, la collaboration sur des sous-tâches différentes, les cellules « coopératives » (au sein desquelles les trajectoires peuvent être partagées ou non) et les robots mobiles assistants.

⁴⁹ Institut National de Recherche et de Sécurité.

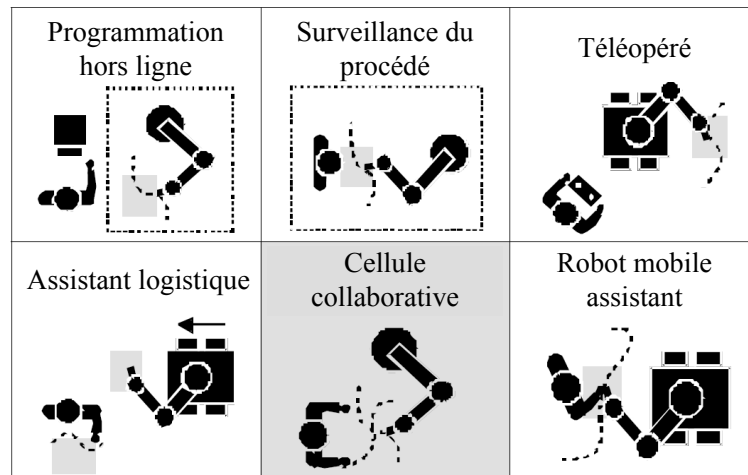


Figure 35 : Typologie de la collaboration homme-robot de Schraft et al. (2005)

En fonction de la modélisation du système cobotique

Librement inspirés des typologies précédentes et de celle présentée par Weistroffer (2015), nous proposons les catégories suivantes, puisqu'elles ont des propriétés différentes selon le schéma du 2.4.2 :

- *Téléopération/supervision* : collaboration en interaction (les interactions pouvant être fines) malgré une séparation physique entre homme et robot.
 - Le schéma de ce système cobotique présente une faible interaction entre opérateur et tâche (cf. 2.4.4.2).
- *Colocalisation collaborative* (fixe ou mobile) sans contact physique entre homme et robot : le robot tient une pièce pour l'opérateur, l'opérateur dispose un colis sur le robot qui va le livrer, etc. Les cas sans collaboration ne nous intéressent pas ici.
 - Le schéma de ce système cobotique présente une faible interaction entre opérateur et robot (cf. 2.4.4.3).
- *Comanipulation* : manipulation conjointe d'une pièce ou d'un outil par l'homme et le robot. Ce dernier peut apporter une valeur ajoutée à la tâche (guides virtuels, amélioration de la précision, etc.).
 - Le schéma de ce système cobotique ne présente pas de différence par rapport au schéma générique (cf. 2.4.4.4).
- *Exomanipulation* : robots revêtus par l'homme, désignés exosquelettes actifs ou encore orthèses robotiques.
 - Le schéma de ce système cobotique présente une faible interaction entre robot et tâche (cf. 2.4.4.5).

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, ou à de la comanipulation.

2.4.4.2 Téléopération

La téléopération est « un ensemble de techniques qui permettent à l'homme de transposer ses capacités d'action (observation, manipulation) en temps réel à distance grâce à des retours sensoriels⁵⁰ » (Garrec, et al., 2010).

⁵⁰ Les retours sensoriels sont le plus souvent des retours visuels, haptiques ou sonores.

Elle peut être effectuée depuis un poste de commande éloigné (salle de commande, par exemple) mais aussi sur un poste déporté dans l'atelier (pupitre proche de l'opération, par exemple). Une donnée importante de la téléopération est la représentation qu'aura l'opérateur depuis son poste de pilotage de la tâche effectuée par le robot dans l'atelier. Pour se représenter la situation, il doit disposer des données techniques et sensorielles, et des moyens d'action nécessaires au bon déroulement de la tâche. Le retour visuel peut être direct, à travers une vitre, un hublot, ou retransmis par l'intermédiaire de caméras. Il peut être complété par des moyens de réalité virtuelle ou augmentée (Garrec, Riwan, David, & Measson, 2010; Milgram, Rastogi, & Grodski, 1995). La téléopération a été explorée notamment pour le nucléaire et la médecine (Pennel, Ferrel, Coello, & Orliaguet, 2002; Barbé, 2008; Piolain, et al., 2010).

Dans l'industrie, la téléopération est principalement utilisée pour les postes pour lesquels l'opérateur est dans l'incapacité d'intervenir (milieux à risque, trop petite ou trop grande échelle), mais pour lesquels son expertise (raisonnements et/ou geste professionnel) est nécessaire. Ce type de système est utilisé en chirurgie (pour changer d'échelle, filtrer les tremblements), dans le spatial (pour éviter d'effectuer une sortie en combinaison spatiale), dans le militaire (principalement pour le pilotage de drones aériens, terrestres et marins) ou dans le civil (pour des opérations de *Search and Rescue* par exemple).

La téléopération dispose de deux modes de fonctionnement principaux. Le premier est la supervision⁵¹ (Sheridan, 1992), pour lequel un (ou plusieurs) opérateur programme de façon intermittente et reçoit de l'information en permanence d'un robot qui est étroitement relié au procédé ou à l'environnement de la tâche, par l'intermédiaire d'effecteurs et de capteurs (Figure 36 et Figure 37). Sheridan (1992) décompose la supervision en cinq étapes : (1) la planification de la tâche et de la manière de la réaliser, (2) la programmation ou l'apprentissage du système robotique, (3) la surveillance des actions automatiques pour détecter et localiser les dysfonctionnements, détecter des conflits entre action et objectifs et anticiper, (4) l'intervention pour spécifier un nouvel objectif ou prendre la main, et (5) l'apprentissage par expérience.



Figure 36 : Schéma du principe du *supervisory control* de Sheridan (1992)

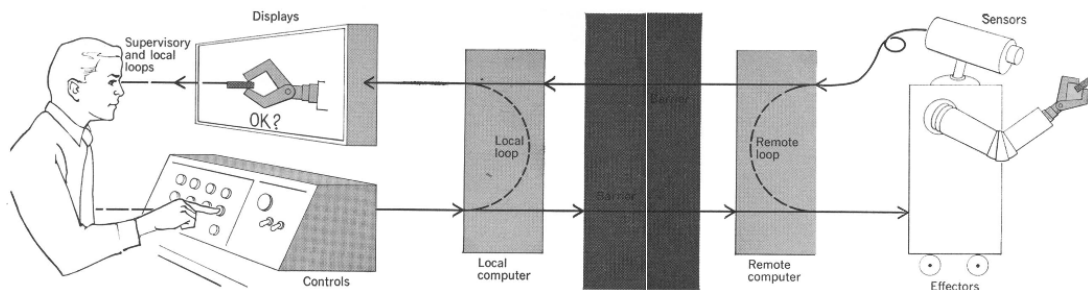


Figure 37 : Schéma de concept du contrôle supervisé d'un télérobot (Ferrell & Sheridan, 1967)

⁵¹ Le terme anglais de Sheridan (1992) pour la supervision et le *supervisory control*.

Le deuxième mode de fonctionnement de la téléopération est la télémanipulation, souvent schématisée comme une relation de maître/esclave entre l'homme et le robot, à l'aide de moyens d'interaction haptiques.

Dans le cas où la téléopération nécessite la conception d'un poste de commande, il faut veiller à prendre en compte pour l'implantation à la fois les bâtiments et espaces de travail, les machines et outils, les systèmes d'information, l'organisation du travail et la formation (Thibault, 2000).

2.4.4.3 Colocalisation collaborative

Il est ici question des applications pour lesquelles l'homme et le robot partagent le même espace de travail en collaborant, dont il existe de nombreux exemples (Lasota, Rossano, & Shah, 2014; Tan, Duan, Zhang, Kato, & Tamio, 2009; Koskinen, Heikkilä, & Pulkkinen, 2009; Effidence, 2017). Les principaux cas de figure de la colocalisation sont énumérés ci-dessous :

- le robot tient une pièce sur laquelle l'opérateur a différentes actions à accomplir (personnalisation) ;
- le robot réalise une opération sur une pièce positionnée par l'opérateur ;
- le robot suit/devance l'opérateur, comme une boîte à outils mobile, ou pour porter des pièces (logistique par exemple) ;
- le robot approvisionne/décharge le poste de l'homme ;
- le robot permet la téléprésence d'un opérateur expert ;
- le robot aide à l'inspection dans un environnement partagé.

Dans ces cas de figure, les interactions entre homme et robot sont faibles, bien qu'ils coopèrent. L'environnement physique étant partagé, il faut cependant veiller à répondre aux fortes contraintes de sécurité qui en découlent⁵² : limiter la vitesse, les efforts, prévoir des arrêts de sécurité, etc.

2.4.4.4 Comanipulation

Le terme comanipulation est employé pour désigner la manipulation conjointe d'une pièce ou d'un outil par l'homme et le robot. L'opérateur peut directement se saisir du robot, utiliser des poignées ou bien son effecteur pour pouvoir le piloter. Dans certains cas, l'opérateur peut aussi manipuler une pièce portée par le robot. Le système robotique peut aussi, en fonction du besoin, disposer d'autres moyens de contrôle comme des boutons de commande ou des écrans.

Un poste en comanipulation nécessite une analyse des risques poussée pour éviter que l'opérateur ne subisse des chocs ou des compressions. Le pilotage doit être conçu pour être adapté à l'activité de l'opérateur : contrôle visuel, manipulation simple et intuitive, position de confort, etc. Le plus souvent, la comanipulation sert à augmenter les efforts fournis par l'opérateur, à compenser le poids, les inerties ou à guider avec des chemins et surfaces virtuelles (Maurice, 2015; Lamy, 2011).

2.4.4.5 Exomanipulation

L'exomanipulation consiste pour l'opérateur à revêtir le robot, souvent qualifié d'exosquelette (actif) ou de robot orthétique. Nous nous intéressons ici uniquement aux exosquelettes actifs, puisque les exosquelettes passifs, n'étant pas programmables, sont plutôt classés dans les moyens d'assistance que dans les robots. Généralement, ces robots assistent les membres inférieurs, les membres supérieurs ou les deux à la fois. Ils sont régulièrement utilisés pour diminuer les efforts fournis par les opérateurs lors de manutentions. Ils peuvent servir pour assister l'opérateur lors d'un maintien statique. Ils ont de plus vocation, grâce à leurs capacités propres concernant la réalisation de la tâche, à guider l'opérateur sur les bonnes trajectoires par exemple. Ils disposent pour cela de fonctions d'intelligence artificielle (ou augmentée) leur permettant d'anticiper à court terme les actions de l'opérateur.

⁵² Cf. norme ISO 10218-2 (2011).

Bien qu'il ait fait l'objet de développements depuis des décennies^{53,54} (cf. Figure 38), ce type de système cobotique est celui qui est à ce jour le moins mature et le plus complexe à mettre en œuvre. La première raison est l'absence de connaissance sur les potentiels effets de leur utilisation à long terme, qui peuvent être problématiques notamment du point de vue du report de charge sur le corps de l'opérateur (Atain Kouadio, Sghaier, & Picot, 2014). Il y a en plus des limites techniques (autonomie de la batterie, réduction du poids des éléments, etc.) des limites d'intégration homme-robot complexes à dépasser (Sylla, Bonnet, Venture, Armande, & Fraisse, 2014; Morinière, Verney, Abroug, Garrec, & Perrot, 2015), comme par exemple l'attache de l'exosquelette sur le corps, les articulations qu'il faut adapter à celles de l'homme, le temps mis pour le revêtir ou encore le calibrage de l'assistance.

N'étant donc pas mature pour l'industrie, les systèmes d'exomanipulation ne feront pas l'objet de développements plus détaillés dans cette thèse.

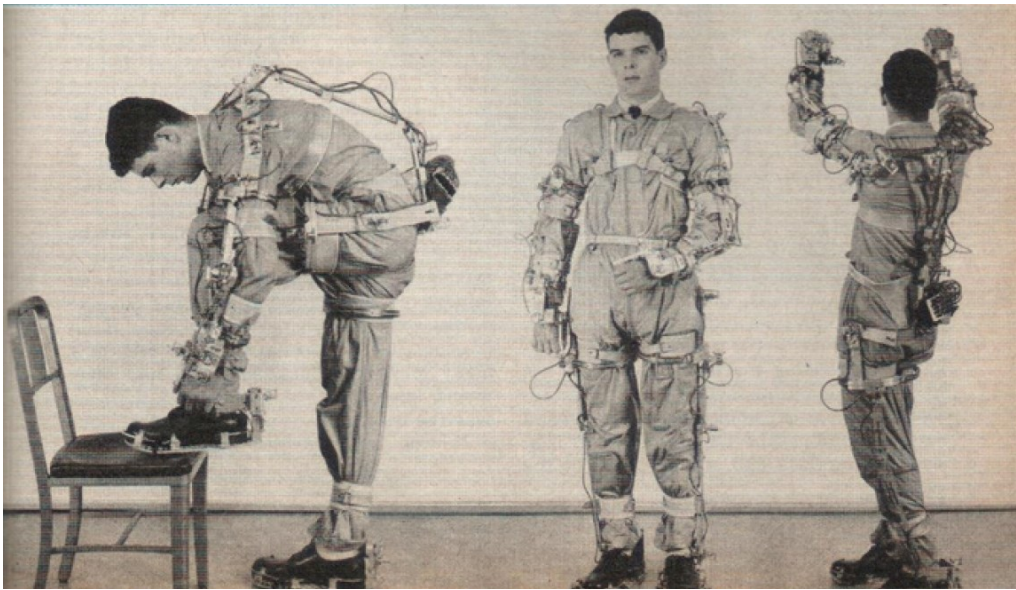


Figure 38 : La flexibilité de l'exosquelette démontrée par le technicien Ronald Patterson (Cloud, 1965)

⁵³ Comme l'illustrent les articles de Tinsley (1961) et de Mizen (1968).

⁵⁴ Nous avons assisté à une démonstration impressionnante d'un exosquelette actif pour les membres inférieurs, sur le site de Safran Electronic and Defense en 2016 qui nous a prouvé les avancées dans ce domaine.

Chapitre 3 Méthodologie de conception d'un système cobotique

Dans le deuxième chapitre, nous avons expliqué le concept de système cobotique. Ce troisième chapitre se base sur le contexte au sein des sociétés Ariane Group et Safran Group, et décrit les critères industriels nécessaires à la conception de ces systèmes. Puis, nous évoquerons différentes approches méthodologiques, sur lesquelles nous nous appuyons pour construire la nôtre. Le principe de notre approche d'ingénierie des systèmes cobotiques est de prendre en compte conjointement les aspects humains et robotiques, tout en répondant au besoin industriel.

3.1 Critères industriels de l'approche méthodologique

3.1.1 Spécificités et contexte chez Ariane Group et Safran Group

Ariane Group est une société créée en 2016, joint-venture de filiales d'Airbus (Airbus Defense and Space) et de Safran (Safran Herakles). L'activité principale d'Ariane Group est la conception et fabrication de fusées. La deuxième composante de son activité concerne le domaine militaire. Enfin, Ariane Group profite du développement de compétences et d'expertises pour ces deux domaines pour diversifier son activité vers d'autres secteurs, aussi divers que les installations critiques ou la fabrication de systèmes pour airbags par exemple.

Le « projet cobotique Safran » a été lancé puis piloté par le responsable ergonomie du groupe Safran en 2013. Pour travailler sur le sujet, il regroupe dans la foulée un binôme de deux doctorants en robotique et cognitive au sein de Safran Herakles en 2014. Les travaux effectués durant ces trois années de thèse étaient bien évidemment directement à destination d'Ariane Group, mais également à destination de Safran Group, au travers du partage d'avancées scientifiques et techniques ainsi que de retours d'expérience.

L'hypothèse initiale des thèses est l'intérêt de réunir une équipe pluridisciplinaire (Claverie, 2010) comportant des compétences en cognitive, robotique et ergonomie pour concevoir un système cobotique ne négligeant ni l'aspect humain, ni l'aspect robotique. Les compétences en cognitive et en robotique, épaulées par celles de l'ergonome, étaient alors rares au sein de Safran Group et Ariane Group.

Bien que les compétences en robotique et en ergonomie se soient chacune développées au travers de groupes de travail depuis 2013, la réunion des compétences pour l'analyse et la conception demeure exceptionnelle. L'un des objectifs de la thèse est donc d'évaluer l'apport de cette pluridisciplinarité pour mettre en œuvre une approche interdisciplinaire de conception d'un système qui s'inscrit dans un domaine transdisciplinaire, la cobotique.

3.1.2 Performance et aspects économiques

Pour qu'un système cobotique soit accepté, il faut qu'il participe à l'amélioration de la performance globale, c'est-à-dire à son efficacité (taux d'accomplissement des objectifs) et à son efficience (taux d'accomplissement des objectifs par rapport aux ressources consommées).

La cobotique peut apporter des solutions pour des postes dont la complexité est trop chère ou impossible à gérer sans intervention humaine. Ainsi, au lieu d'investir massivement dans des dispositifs complexes, on confie une partie de cette complexité à l'expertise humaine. De plus, l'alliance des capacités humaines et robotiques permet de s'affranchir d'une partie des limites de chacun, et ainsi de décupler la productivité et/ou la qualité suivant les besoins du poste de travail.

Faisant partie des quatre enjeux de l'Industrie du Futur, la flexibilité est le premier critère cité lorsque l'on évoque la cobotique. Ce terme flou recouvre la résilience (capacité de réguler les perturbations), la capacité d'adaptation du système (la facilité de le reprogrammer pour une évolution de la tâche), et la facilité de l'utiliser sur plusieurs applications différentes, c'est-à-dire sa polyvalence. Bannat et al. (2011) insistent sur la demande croissante des industriels en flexibilité, justifiée par la demande changeante des consommateurs, le raccourcissement des cycles de vie des produits et la tendance à la customisation. Faisant le même constat, Gambao et al. (2012) notent que la tendance actuelle en industrie est aux cycles de production plus courts, à la réduction du *time-to-market* et à une demande axée sur plus de flexibilité. Ainsi, l'approche des systèmes hybrides homme-technologie est selon eux la meilleure solution, associant la « robotisation flexible » aux compétences humaines.

Les systèmes cobotiques sont par ailleurs une réponse supplémentaire aux postes problématiques de l'entreprise. La pénibilité du travail et l'absentéisme (dû par exemple à des accidents ou maladies professionnelles de type troubles musculo-squelettiques) peuvent être réduits en soulageant l'opérateur qui collabore finalement avec un robot. Non seulement cela peut participer à la résolution d'enjeux importants de santé au travail, mais cela décuple potentiellement les capacités de l'opérateur, qui peut avec l'aide du robot travailler sur des pièces plus lourdes, encombrantes, limiter ses gestes répétitifs, ou être à distance d'environnements hostiles par exemple.

La maturité d'une technologie est une problématique largement répandue dans l'industrie, principalement pour piloter l'avancement des projets de conception. Elle est souvent abordée par l'intermédiaire d'un indicateur largement utilisé : le TRL⁵⁵. Pour la cobotique, la maturité globale du système peut difficilement être traitée par le TRL. En effet, la maturité de l'assemblage de technologies ne correspond pas à la somme de la maturité intrinsèque de chacune d'entre elles. De plus, le TRL ne permet pas d'aborder les aspects humains du système cobotique.

Boy (2005) décrit deux périodes de vie pour une technologie : la période pendant laquelle les objectifs sont technologiques et de performance, puis celle dont les objectifs sont la facilité d'utilisation, la fiabilité et le prix. Les équipes de production, dans les ateliers, et les décideurs, attendent des dispositifs qu'ils répondent aux objectifs de la deuxième période. Ils ne cherchent pas la rupture technologique, mais la sécurité, des fonctionnalités adaptées aux besoins et une expérience positive et enrichissante. Les technologies pour la cobotique sont probablement à la transition entre ces deux phases. Les préoccupations des industriels sont tournées à la fois vers la maturité technologique (première phase) et sur la sécurité/réglementation et les coûts (deuxième phase). Ils s'intéressent en revanche très peu aux attentes des opérateurs et aux usages associés aux nouveaux robots industriels. Ceci est probablement dû à une vision technocentrée des moyens de production, qui considère la technologie comme indépendante des utilisateurs (cf. 3.2.1). Cherchant à concevoir un système incluant homme et technologie, nous préférons par la suite aborder la maturité du système cobotique, plutôt que la maturité technologique.

⁵⁵ Technological Readiness Level (cf. 3.4.4).

La cobotique, voie d'augmentation des capacités humaines, est une opportunité pour favoriser l'accès au poste à un personnel plus large, avec une diversité des capacités physiques et cognitives importante. Ainsi, par exemple, le maintien dans l'emploi des opérateurs avançant dans l'âge, ou l'ouverture des postes à des personnes handicapées peuvent être rendus possibles par la collaboration homme-robot (Herlant, Holladay, & Srinivasa, 2016). Ceci, ainsi que la possible amélioration de l'intérêt au travail, sont susceptibles de faciliter la gestion des ressources humaines.

Enfin, étant un des points phares de l'Industrie du Futur, la cobotique est un atout de communication pour l'entreprise, qui peut s'en servir pour soigner son image, mettre en valeur des innovations technologiques qui améliorent les conditions de travail.

Les aspects sécurité/réglementation de la cobotique et l'appropriation de la technologie par les opérateurs sont traités plus longuement dans les sections suivantes. Nous évoquerons ensuite les questions éthiques que posent les systèmes cobotiques pour l'industrie.

3.1.3 Sécurité et réglementation

3.1.3.1 Sécurité

La sécurité vise en priorité à préserver la santé de l'homme, mais aussi à préserver l'état du matériel, c'est-à-dire, en général, le robot, les outils et les pièces. La sécurité du matériel est traitée en robotique, mais nécessite une attention particulière puisqu'ici le robot collabore avec l'homme, qui peut donc être une autre source à la fois de sécurité et d'insécurité pour le matériel. Ici, il ne sera question que de la sécurité des opérateurs dans les systèmes cobotiques.

La réglementation traite déjà largement, à travers les normes, de la sécurité. Des guides expliquant les normes et proposant des recommandations sont d'ailleurs régulièrement publiés (Faber, Bützler, & Schlick, 2015; Jocelyn, Burllet-Vienney, Giraud, & Sghaier, 2016; Acoulon, 2013). La robotisation transforme les types d'incident d'une activité, leur fréquence et leurs conséquences de façon difficilement prévisible (Woods D. D., 1996). L'anticipation des incidents lors de la conception est donc déterminante pour la sécurité. Aussi, la résilience d'un système contribue à sa sécurité puisqu'elle permet la gestion de situations inhabituelles, de perturbations nouvelles inconnues des concepteurs (Hollnagel, Woods, & Leveson, 2006).

Partage d'espace de travail

Le partage d'espace de travail (dans les systèmes de colocalisation, de comanipulation, et d'exomanipulation) est souvent choisi pour améliorer la productivité, les conditions de travail et la sécurité. La sécurité de l'homme vis-à-vis du nouveau dispositif technique est alors un sujet majeur. Pourtant, il n'est traité que depuis peu, du fait de l'émergence ces dernières années de nouvelles normes (cf. 3.1.3.2). Pour permettre une proximité entre homme et robot, il faut réduire les risques physiques (collisions/compressions, brûlures, vibrations, etc.), mais ne pas oublier les postures/efforts/répétitivité liés à l'activité de l'opérateur, traiter les risques psychosociaux (par exemple le stress du travail avec le robot), et réduire au maximum les risques liés au procédé de fabrication. La sécurité de l'homme dans le système est assumée par les propriétés matérielles du dispositif technique, le *hardware* (comme par exemple l'absence d'arrête saillante, l'impossibilité de se pincer ou des capteurs de présence), et/ou par ses propriétés logicielles, le *software* (comme une limitation en vitesse et/ou en effort ou des butées virtuelles).

Pour éviter les collisions/compressions dangereuses, il y a trois types de systèmes de sécurité dont on peut doter le robot (Michalos, et al., 2015) :

- la sécurité au contact : s'assure que les collisions homme-robot sont sûres, contrôlées, en limitant la puissance/force exercée sur l'homme ;

- la sécurité active : détecte les collisions imminentes et stoppe le système pour les éviter, par des capteurs tels que des systèmes de vision par exemple ;
- la sécurité adaptative : anticipe et évite les collisions sans arrêter les opérations.

Pour évaluer les conséquences de contacts robot-opérateur, plusieurs laboratoires, notamment en Allemagne, ont réalisé des *crash tests* qui ont pu enrichir les données normatives de sécurité (Haddadin, Albu-Schäeffler, & Hirzinger, 2007; Oberer & Schraft, 2007).

La prise en compte de la sécurité se fait de façon tout à fait différente dans la collaboration distante, que nous appelons dans cette thèse la téléopération.

Téléopération

Au premier abord, les moyens de téléopération n'entrent pas dans les systèmes pris en compte dans la sécurité physique. Ils permettent notamment aux opérateurs d'être éloignés d'un milieu hostile (voir 2.4.4.2), généralement dans un poste de commande dont la sécurité ne doit toutefois pas être négligée. Les opérateurs sont alors éloignés du robot. En revanche, pour ce type de système cobotique comme pour les autres, il faut veiller à la sécurité des opérateurs pour toutes les phases de fonctionnement lors desquelles l'opérateur est susceptible d'être à proximité du robot (maintenance, nettoyage, etc.). De plus, il est envisageable pour un robot téléopéré d'être dans l'espace de travail d'un opérateur (par exemple robot mobile téléopéré dans un atelier logistique peuplé d'hommes). Dans ce cas-là, la prise en compte de la sécurité physique de ces opérateurs est indispensable, on se trouve dans le cas de figure du partage d'espace de travail.

3.1.3.2 Règlementation

La réglementation, essentiellement faite pour assurer la sécurité des opérateurs, est traitée de façon différente selon le matériel utilisé dans le système cobotique. En effet, il existe des normes spécifiques pour les robots manipulateurs industriels – norme ISO 9283 (1998), les postes de commandes – norme NF EN ISO 11064-4 (2014), les dispositifs tactiles et haptiques – norme ISO 9241-910 (2011), la sécurité des machines – norme ISO 12100 (2010), etc.

Ici, nous restreignant au périmètre français, nous nous attarderons sur la récente évolution des normes autorisant la présence d'hommes et de robots dans le même espace de travail en production. C'est la mise à jour de la Directive Machine⁵⁶ en 2006 qui a ouvert cette possibilité de coprésence à condition que l'on effectue une analyse des risques poussée (Parlement européen, 2006).

Quelques années plus tard, en 2012, une norme en deux parties sur les « robots collaboratifs⁵⁷ » voit le jour. La première partie de la norme ISO 10218 (2011) est à destination des fabricants de robots, puisqu'elle aborde les caractéristiques intrinsèques nécessaires au partage d'espace de travail. La seconde, qui nous intéresse plus particulièrement, est à destination des intégrateurs de robots, c'est-à-dire des concepteurs d'installations robotiques industrielles. En effet, elle traite de l'intégration des robots dans des cellules au sein desquelles les hommes sont présents physiquement.

Enfin, la dernière en date n'est pas tout à fait une norme, mais un guide de spécifications techniques⁵⁸, qui donne des indications pour concevoir un système cobotique sûr. Toujours est-il que les recommandations figurant dans les normes ne remplacent pas une analyse des risques (ADR) et une analyse des modes nominal, transitoire et dégradé, déterminantes pour tous les projets cobotiques dont la téléopération.

⁵⁶ Document qui décrit les réglementations pour pouvoir labelliser une machine « CE ». Ces réglementations doivent être suivies pour toutes les machines fonctionnant dans l'union européenne, vendues par ou à des usines de l'union européenne.

⁵⁷ Il ne s'agit pas ici de collaboration mais de partage d'espace de travail.

⁵⁸ Cf. ISO/TS 15066 (2016).

3.1.4 Acceptabilité, acceptation et confiance

L'acceptabilité est la propension d'un dispositif technique à être accepté par ses utilisateurs. L'acceptation est donc relative aux utilisateurs, à la façon dont ils perçoivent un dispositif technique. La confiance est la tendance d'un utilisateur à se fier à un dispositif technique.

3.1.4.1 De l'acceptabilité à l'acceptation

Selon Nielsen (1993), l'acceptabilité d'une technologie comporte deux composantes : l'acceptabilité pratique et l'acceptabilité sociale. L'acceptabilité pratique correspond aux fonctionnalités et à l'usage, elle comprend donc notamment l'utilité et l'utilisabilité. L'acceptabilité sociale « inclut les impressions des utilisateurs, les attitudes et les contraintes sociales et normatives conduisant à choisir ou supporter l'utilisation d'une technologie donnée » (Bobillier-Chaumon & Dubois, 2009). Dans un projet industriel de robotisation, l'acceptabilité sociale est influencée par de nombreux paramètres, tels que la possible perte d'emploi, la montée en compétences, la survie de l'entreprise, les conditions de travail, la responsabilité des erreurs, la culture personnelle et collective, ou encore les possibles personnalisations pour les opérateurs.

L'acceptabilité des systèmes est favorisée par la conception dite centrée humain (Boy, 2011). En revanche, un trop plein ou une sous-charge d'activité, des interruptions fréquentes, ou une perte d'intérêt du travail (par exemple en reléguant l'opérateur à un rôle de « presse-bouton » ou d'assistant de la technologie) sont des facteurs qui l'entravent fortement.

Pour maximiser l'acceptabilité, le respect des conventions sociales est déterminant. Cela concerne l'apparence du robot et sa ressemblance avec l'homme (cf. Figure 39), ou encore la « proxémie⁵⁹ » (Hall, 1963) par exemple. Ces travaux ont été repris par des laboratoires de robotique interactive (Kruse, Pandey, Alami, & Kirsch, 2013; Shibata & Inooka, 1998), et pour des applications industrielles (Weistroffer, et al., 2014; Arai, Kato, & Fujita, 2010). Les conventions sociales ont été prises en compte dans la conception de robots susceptibles de collaborer, et ont ainsi amélioré leur acceptabilité.

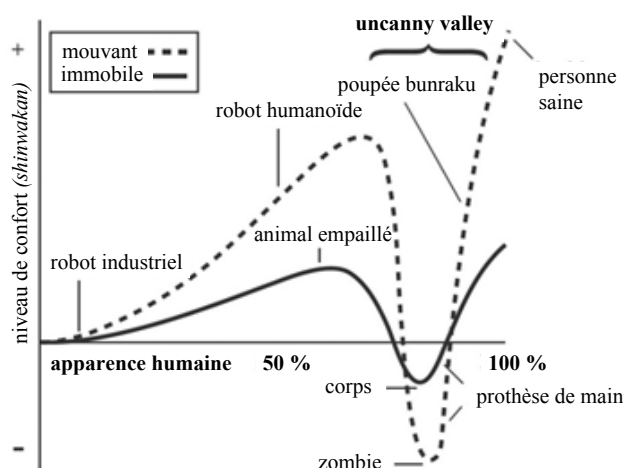


Figure 39 : Relation entre le confort de l'homme et le caractère « human-like » des agents artificiels, the « uncanny valley » de Mori (1970)

⁵⁹ La proxémie englobe notamment des études anthropologiques sur la distance sociale pour une interaction.

Bobillier-Chaumon et Dubois (2009) distinguent l'acceptabilité, propriété des systèmes techniques, et l'acceptation, processus sociocognitif propre à l'homme, qui s'intéresse au vécu des personnes. Ainsi, une bonne acceptabilité intrinsèque d'une technologie est insuffisante, puisque les opérateurs peuvent tout de même le rejeter pour une raison individuelle, organisationnelle, sociale ou culturelle. L'acceptation, appropriation ou encore adoption d'une technologie n'est pas déterministe, elle relève principalement de processus psychologiques de représentation, qu'ils soient individuels, collectifs ou organisationnels (Bobillier-Chaumon & Dubois, 2009).

À noter qu'au-delà des risques de refus, l'introduction de nouvelles technologies est un facteur potentiel de risques psycho-sociaux qu'il ne faut pas sous-estimer (Murashov, Hearl, & Howard, 2016).

Nous prendrons en compte ces facteurs d'acceptation en intégrant les futurs utilisateurs dans la conception (cf. 3.3).

3.1.4.2 Confiance pour la collaboration homme-robot

La confiance est définie par Mayer et al. (1995) comme suit : « willingness of a party to be vulnerable to the actions of another party based on the expectation that the other will perform a particular action important to the trustor, irrespective of the ability to monitor or control that party ». Librement traduit, c'est la propension d'un agent à déléguer à un autre la responsabilité d'actions auxquelles il est vulnérable. Comme Lee et See (2004), nous retiendrons cette définition.

L'opérateur sera plus enclin à se reposer sur le système s'il a confiance (Endsley, *Autonomous Horizons: System Autonomy in the Air Force - A Path to the Future. Volume I: Human-Autonomy Teaming*, 2015), et il peut à l'inverse ne pas utiliser un système bien conçu et fiable s'il ne lui fait pas confiance (Parasuraman & Riley, 1997). Par exemple, d'après Lee et Moray (1992), un pilote ayant une confiance faible dans un système automatisé et confronté à une alarme, va prendre du temps supplémentaire pour vérifier le problème, voire ignorer totalement l'alarme. Dans la conception, il faut également éviter l'excès de confiance, qui pousse l'opérateur à se reposer abusivement sur la technologie. Parasuraman et Riley (1997) énoncent des recommandations pour éviter l'utilisation résultant d'une confiance excessive⁶⁰ (*misuse*), l'utilisation résultant d'une confiance insuffisante (*disuse*) et l'utilisation inappropriée envisagée par les concepteurs et managers (*abuse*).

La confiance va au-delà du simple reflet de la performance du robot, elle dépend de la compréhension qu'a l'opérateur de l'influence du contexte sur les capacités du robot (Lee & See, 2004). Ainsi, concevoir des interfaces et formations qui informent les opérateurs sur le but, le procédé en cours et la performance du robot améliore l'adéquation entre confiance et situation.

Les individus ne réagissent pas de la même manière face à la robotisation, il y a une grande disparité de réaction vis-à-vis de l'utilisation ou non d'un robot, qui est de ce fait difficile à prévoir (Parasuraman & Riley, 1997). Elle dépend de la comparaison par l'utilisateur de sa confiance en lui avec celle qu'il accorde au robot (Lee & Moray, 1992). L'évaluation des avantages liés à l'utilisation d'un robot est appelée « *cognitive overhead*⁶¹ » (Kirlik, 1993).

Enfin, les hommes répondent « socialement » à la technologie ; les dimensions affectives, émotives, ont un rôle dans l'interaction homme-robot (Lee & See, 2004). En partant de la notion d'acceptabilité, nous avons étudié celle d'acceptation, puis pour se rapprocher encore un peu plus de l'usage, celle de confiance. Nous aurions pu aller plus loin encore en nous concentrant sur la place accordée par l'homme au robot (voir inversement) du point de vue émotionnel et affectif.

⁶⁰ Aussi désignée « complaisance » (*complacency*) dans la littérature.

⁶¹ Le point de vigilance souvent cité à propos du « *cognitive overhead* » est l'augmentation de la charge de travail qui en résulte.

Dans la recherche d'une approche de conception du système cobotique, nous veillerons dans la suite de ce chapitre à prendre en compte conjointement l'homme et le robot du point de vue de la performance, de la sécurité et de l'acceptabilité des solutions technologiques.

3.2 Approches méthodologiques pour la cobotique

3.2.1 L'approche technocentrée de la « robotique classique »

Nous avons déjà évoqué la « robotique classique » pour désigner l'approche se limitant à la conception d'un système robot, se basant sur la tâche à réaliser, c'est-à-dire la tâche prescrite. L'opérateur est alors relégué aux tâches résiduelles que l'on n'a pas su ou pas pu automatiser (Hoc, 1998). Cette vision technocentrée s'intéresse d'avantage au travail théorique qu'au travail réel, ne prenant pas ou peu en compte le rôle futur de l'opérateur dans la conception.

Les premières approches de conception « homme-machine » ont cherché à tirer parti des qualités de l'homme disposant de capacités physiques et cognitives, et du robot mêlant hardware et software. De nombreux travaux ont ainsi tenté de classer les tâches à effectuer (ou fonctions à satisfaire) : celles pour lesquelles les hommes sont meilleurs d'une part, et celles pour lesquelles les robots sont « meilleurs » d'autre part. Une des premières tentatives fut celle de Fitts (1951), qui produisit une liste répartissant les tâches entre homme et machine appelée *Men Are Better At-Machines Are Better At* ou MABA-MABA (cf. Tableau 14).

<i>Les tâches pour lesquelles les humains sont meilleurs</i>	<i>Les tâches pour lesquelles les machines sont meilleures</i>
Détecter une petite quantité d'énergie visuelle, auditive ou chimique	Répondre rapidement à un signal de contrôle
Percevoir des patterns de lumière ou de son	Appliquer des efforts importants de façon régulière et précise
Improviser et user de procédures de façon flexible	Stocker de l'information rapidement, l'effacer totalement
Stocker de l'information sur de longues périodes et se rappeler des parties appropriées	Raisonner de façon déductive
Raisonner de façon inductive	
Exercer un jugement	

Tableau 14 : Traduction de la *Fitts' list* (Fitts, 1951), « *Men are better at* » et « *Machines are better at* »

La liste de Fitts comporte des limites. Bainbridge (1983) critique le fait qu'elle ne traite ni des interactions homme-système, ni de la performance future de l'opérateur, ni de sa motivation. Les approches type MABA-MABA et ses dérivées retrouvées sous l'appellation « *function allocation* » (répartition des fonctions), ont été critiquées. Certains auteurs justifient son caractère terriblement réducteur sur la transformation du travail humain (Dekker & Woods, 2002).

Robotiser un procédé est équivalent à émettre une hypothèse quant à l'amélioration de l'activité par le système (Goodrich & Schultz, 2007). Ainsi, une fausse idée, pourtant répandue, est que la « robotisation classique » améliore forcément la performance du système en éliminant les variabilités et erreurs humaines (Lee & Seppelt, 2009) et en minimisant les interactions homme-robot (Cummings, 2014). La plupart des processus d'introduction de nouvelles technologies sont justifiés par l'impact positif supposé sur la performance humaine, c'est-à-dire la réduction de la charge de travail, la concentration des opérateurs sur la partie importante des opérations, la réduction des erreurs, etc. Toutefois, les études traitant de l'impact de l'automatisation sur la cognition et le comportement des

opérateurs ont montré à maintes reprises que ces nouveaux systèmes introduisaient une nouvelle complexité à gérer et de nouveaux types d'erreurs, souvent minimisés par les concepteurs (Woods D. D., 1996).

Bainbridge (1983) recense les ironies de l'automatisation. Elle souligne, elle aussi, la tendance des concepteurs à considérer les opérateurs comme facteur dégradant la fiabilité, alors qu'il fiabilise la réalisation de la tâche en régulant à l'aide de son expertise (cf. 2.1). En revanche, nombre des difficultés opérationnelles ont pour origine des erreurs de conception. Bainbridge fait le constat paradoxal du concepteur confiant la tâche à l'opérateur lorsqu'il ne sait pas comment automatiser.

Suivant la même idée, Woods (1996) affirme que profiter des opportunités offertes par les nouvelles technologies est impossible avec « une vision idéaliste et des affirmations superficielles », ajoutant qu'il faut privilégier l'examen, par des études et modélisations, des facteurs cognitifs du système homme-machine au travail pour comprendre et prédire les conséquences de la transformation. La vision du concepteur idéaliste est corroborée par Millot et al. (2015), qui introduisent le concept d'« Humain Magique » pour décrire la représentation de l'opérateur qu'ont les concepteurs, qui le considèrent souvent comme omnipotent et omniscient, comme solution miracle à tous les problèmes.

La « robotique classique » a un impact fort sur la charge de travail. En effet, en sortant l'homme de la boucle de contrôle, on réduit sa connaissance de l'activité en cours, sa conscience de la situation, ce qui peut mener au phénomène de « complaisance⁶² » (Endsley & Kiris, 1995). C'est ainsi que l'automatisation augmente la charge de travail pour des situations demandant beaucoup de ressources, et la diminue pour des situations en demandant très peu (Bainbridge, 1983).

L'introduction de robots fait émerger de nouveaux rôles pour l'opérateur (Dekker & Woods, 2002). L'homme ne s'adapte pas à la technologie mais son activité se transforme, ce qui l'amène à adapter la technologie à ses nouveaux besoins ou aux besoins de la situation. Les concepteurs doivent donc viser une compréhension des activités humaines plutôt qu'un remplacement de fonctions par une machine, et formuler des hypothèses plutôt que des prescriptions. L'évaluation des hypothèses doit si possible se faire en impliquant les utilisateurs futurs (Boy & McGovern Narkevicius, 2014).

Enfin, lors de robotisations, de nombreux problèmes proviennent d'écarts entre les attentes des acteurs des projets, principalement entre les concepteurs, les managers et les opérateurs (Parasuraman & Riley, 1997).

Les constats énoncés ci-dessus (synthétisés dans le Tableau 15) amènent à revoir la façon de robotiser des postes de travail, en se basant plus sur l'activité des opérateurs experts, en expérimentant avec eux en conception, en prenant en compte leur future activité, et en constituant des groupes de travail pour réduire l'écart entre les parties prenantes.

⁶² Traduit de l'anglais *complacency*, la complaisance est un phénomène bien connu dans l'étude de l'homme vis-à-vis de l'automatisation. Il traduit la tendance de l'homme à surestimer la technologie, à lui accorder trop de crédit pour la réalisation d'une tâche.

	<i>Approche technocentrée</i>	<i>Éléments omis par l'approche technocentrée</i>
<i>Projet de robotisation</i>	Amélioration de la performance considérée comme acquise Souhait de minimiser l'« erreur humaine »	Nouvelle complexité à gérer pour les opérateurs Ecart entre les attentes des différents acteurs
<i>Travail futur</i>	Tâches résiduelles confiées à l'opérateur Focalisation sur les tâches théoriques	Rôle futur de l'opérateur Transformation du travail Implication des opérateurs Prise en compte des réalités du terrain
<i>Opérateur</i>	Dégradant la fiabilité, source d'erreur pour la situation actuelle « Humain Magique » pour la situation future	Régulation des variabilités Charge cognitive suivant la situation Conscience de la situation

Tableau 15 : Synthèse des limites de l'approche technocentrée

Pour la cobotique, l'homme et le robot étant en collaboration, ces conclusions sont d'autant plus pertinentes. Si l'opérateur ou l'interaction homme-robot n'est pas suffisamment étudiée, le système peut être totalement inopérant. Cette thèse ainsi que celle de David Bitonneau (2018), motivées par ces observations, ont conjointement tenté de mettre en place une approche interdisciplinaire pour concevoir des systèmes cobotiques industriels.

3.2.2 Les guides de conception en robotique et cobotique

Il existe plusieurs guides en robotique et cobotique à destination des industriels. Bien souvent, la prise en compte de l'opérateur est réduite à la simple analyse des risques physiques, et parfois à l'idée de réduction de l'« erreur humaine ». Ils se concentrent davantage sur les rôles des différents acteurs du point de vue technique et de la sécurité : *end-user*, intégrateur, fournisseur et organisme de certification.

Ici, nous avons choisi de présenter très sommairement à titre d'exemple les guides pour la robotisation du Symop⁶³ (Symop, 2011) et celui du Cetim⁶⁴ sur la robotique collaborative (Acoulon, 2013). Ces organismes sont deux grands acteurs et accompagnateurs d'industriels sur les sujets de la robotique et de la cobotique en France.

Pour le Symop, la prise en compte des opérateurs est résumée dans le paragraphe « facteurs humains », et se limite aux conditions de travail et de sécurité. Pour illustrer les limites de ce guide sur l'intégration de l'homme, en voici une citation sur l'acceptation du robot par l'opérateur, qui est traitée de façon très optimiste : « il est important de noter le décalage entre l'appréhension de l'opérateur à l'arrivée du robot et sa satisfaction, voire sa fierté selon ses nouvelles fonctions, lorsqu'il constate

⁶³ Le Syndicat des machines et technologies de production (Symop) est l'organisation professionnelle des créateurs de solutions industrielles, fabricants de machines, technologies et équipements pour la production industrielle.

⁶⁴ Le Centre technique des industries mécaniques (Cetim) vise à apporter aux entreprises des moyens et des compétences pour accroître leur compétitivité, participer à la normalisation, faire le lien entre la recherche scientifique et l'industrie, promouvoir le progrès des techniques, aider à l'amélioration du rendement et à la garantie de la qualité.

qu'il est toujours là, et surtout que c'est lui qui « dompte la bête » ! L'arrivée du robot contribue à valoriser les opérateurs, qui se voient déchargés des tâches rébarbatives et pénibles, et confier des missions plus intéressantes à leurs yeux. ». Second exemple, sur la formation des opérateurs : « après une formation d'une semaine, un opérateur est capable de conduire la cellule de production ».

Dans le guide de robotique collaborative du Cetim, ce sont les conditions de sécurité qui prédominent lorsqu'il s'agit d'opérateur. Cela s'explique par le fait qu'il s'inspire de la norme ISO 10218-2 (2011), naissante à l'époque.

Dans les deux cas, une démarche de conception est présentée. Le Symop la décompose simplement en quatre étapes : l'avant-projet pour définir le besoin et la rentabilité, le projet allant de la passation de la commande à la mise en production, la formation des opérateurs de production et de maintenance, et le bilan permettant de faire un retour d'expérience sur le projet. Le guide du Cetim est de ce point de vue plus complet, listant des questions techniques et de gestion de projet à se poser au cours de l'intégration d'un robot. Ces questions intègrent évidemment les aspects technico-économiques, mais mentionnent aussi l'importance de l'acceptation des opérateurs.

Les guides trouvés dans la littérature, comme ceux succinctement décrits ici, nous ont semblé insuffisants, manquant de précision sur les méthodes possibles, les points de vigilance, les aspects cognitifs et d'analyse du travail, d'évaluation du système en cours de conception, ou la méthode de conception de l'activité de l'opérateur par exemple. Après avoir intégré les méthodes de gestion de projet de l'entreprise (cf. section suivante), nous nous sommes donc basés sur l'ergonomie de conception et la conception centrée utilisateur⁶⁵ pour étudier la dimension humaine de la cobotique, et l'ingénierie des systèmes pour l'intégration de l'homme et la conception globale du système cobotique.

3.2.3 Retours d'expérience

Dans la recherche d'une approche méthodologique, nous nous sommes appuyés sur les premiers retours d'expérience sur la conception de systèmes cobotiques présents dans la littérature.

Des développements spécifiques pour compléter l'offre technologique sont réalisés par de nombreux laboratoires et start-ups. De nombreuses thèses en robotique ont été axées sur la collaboration avec des robots. En France, les travaux de Weistroffer (2015) sur l'évaluation de l'acceptabilité, de Lamy (2011) sur le développement d'un effecteur de comanipulation et d'une peau améliorant la sécurité de l'opérateur au contact du robot, ou de Sylla et al. (2014) sur les exosquelettes en sont des exemples révélateurs.

Depuis le début des années 2000, des liens entre laboratoire de recherche en robotique et industriels se sont établis pour réaliser des preuves de concepts de collaboration homme-robot, afin de profiter des perspectives a priori positives qu'elle laissait entrevoir. Le projet ROBO-PARTNER a permis d'obtenir des gains en santé-sécurité-environnement, en temps de cycle et en taux de mobilisation des opérateurs (Michalos, et al., 2014). De plus, trois cas pratiques sur la mise en œuvre de la sécurité sur des postes de travail cobotiques dans l'industrie automobile sont décrits par Michalos et al. (2015), basés sur la spécification technique proposée par l'organisation internationale de normalisation (ISO/TS 15066). Schneider et al. (2015) proposent une plateforme de conception et développement de preuves de concepts notamment à destination des industriels. Par ailleurs, les projets Rob@work (Helms, Schraft, & Hagele, 2002) et PowerMate (Schraft, Meyer, Parlitz, & Helms, 2005) proposent différents modes de collaboration homme-robot. Koskinen et al. (2009), Krüger et al. (2009), Shi et al. (2012) étudient les aspects fonctionnels, sécurité et qualité de la collaboration directe entre homme et

⁶⁵ La conception centrée utilisateur est un ensemble de méthodes pour prendre en compte l'utilisateur final dans la conception d'un artefact.

robot pour une tâche d'assemblage, et Tellaeche et al. (2015) présentent trois projets européens sur la colocalisation collaborative. La liste est encore longue et démontre le foisonnement de l'intérêt autour de la cobotique ces dernières années.

Les résultats probants montrés lors des projets liant laboratoires scientifiques et industriels sont cependant à modérer. Le retour sur un cas de collaboration réelle le plus précis que nous ayons trouvé a été celui d'une installation de comanipulation dans une fonderie pour une opération d'ébarbage publié par l'INRS (Atain Kouadio, Sghaier, & Picot, 2014). Pour ce cas précis, l'industriel a entièrement confié l'expertise à un fournisseur spécialisé. Le Tableau 16 résume les principales conclusions du diagnostic.

<p>Constat sur la méthode dite « audit ergonomique » faite par le fournisseur</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bonne intégration des paramètres biomécaniques ; - ne couvre pas l'organisation du travail, ni la dimension psychosociale (notamment les exigences attentionnelles) ; - pas de traitement spécifique des différentes tactiques (gestuelles) et des marges de manœuvres (de l'ancien et du nouveau poste) pour l'opérateur.
<p>Retour d'expérience sur la performance</p> <p>Lié au pilotage du robot :</p> <ul style="list-style-type: none"> - le maintien en position médiane d'une gâchette obligatoire tout au long de l'activité fatigue et provoque des douleurs au poignet ; - le manque de retours d'effort nuit à la qualité du travail (mobilisation d'autres sens par l'opérateur, ouïe et vue). <p>Conséquences de la modification de l'espace de travail :</p> <ul style="list-style-type: none"> - transformation des notions de proprioception, perception de l'équilibre, etc. ; - moins de liberté de mouvements, changement de tactiques pour les opérateurs ; - augmentation des contraintes perceptives. <p>Baisse de la performance :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 20 % de temps supplémentaire ; - peut être due à un temps d'apprentissage pas encore atteint (cela signifierait une bonne performance mais une durée très longue pour maîtriser le cobot) ; - acceptation par l'entreprise en raison de l'amélioration des conditions de travail ; - l'article ne mentionne pas l'acceptation par les opérateurs.
<p>Risques identifiés</p> <p>D'accidents du travail :</p> <ul style="list-style-type: none"> - collision entre le cobot et un autre opérateur ; - dégradation de la pièce due à la possibilité d'appliquer involontairement un effort très important. <p>Liés à la charge physique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - maintien de la poignée de validation engendre une problématique TMS ; - changement de tactiques gestuelles de l'opérateur : modification de la charge physique ; - l'amélioration des conditions de travail et la baisse de performance peut mener à la réduction du temps de repos par l'entreprise pour augmenter les cadences, qui peut avoir des conséquences néfastes sur la qualité et pour l'opérateur. <p>Liés à la charge mentale :</p> <ul style="list-style-type: none"> - changement de tactiques gestuelles de l'opérateur : modification de la charge mentale, latence du système entre l'intention et le mouvement ; - modification du retour d'effort, modification de la charge mentale, utilisation d'autres sens (vue, ouïe).

Tableau 16 : Constatations lors d'un projet de conception d'un système cobotique (Atain Kouadio, Sghaier, & Picot, 2014)

Dans un cas comparable, Gambao et al. (2012) constatent que l'introduction de systèmes de comanipulation peut poser plusieurs problèmes, dont des postures contraignantes et une structure mécanique qui obstrue la vue de l'opérateur.

Weistroffer et al. (2014) ont étudié la cobotisation d'un poste d'assemblage des portières de voiture dont les problématiques initiales sont une posture contraignante, un mouvement du poignet difficile et la qualité de l'opération. Un robot équipé de capteurs pour détecter la présence de l'homme a été testé.

Lorsque la distance homme-robot était inférieure à 10 cm, un signal sonore était émis et le robot s'arrêtait (pas la ligne d'assemblage) le temps que l'homme s'en écarte. Lors d'une collision, l'arrêt d'urgence était déclenché et le robot et la ligne de production étaient immobilisés. Des simulations ont été menées avec un robot réel et en réalité virtuelle, notamment pour évaluer l'acceptabilité du dispositif technique envisagé, qui est loin d'être acquise en début de projet.

Enfin, de façon plus générale, dans son rapport sur la robotique collaborative, l'IRSST⁶⁶ constate que les entreprises qu'il a consultées choisissent des robots collaboratifs non pas en raison d'un besoin d'interaction homme-robot mais principalement pour leur faible coût et le retour sur investissement rapide présumé (Jocelyn, Burlet-Vienney, Giraud, & Sghaier, 2016), ce qui mène à l'installation croissante de cellules automatisées pourtant désignées comme « cobotiques » plutôt que réellement collaboratives.

Ces derniers retours d'expérience nous ont confortés dans notre approche interdisciplinaire de conception de ces nouveaux systèmes, dans la volonté de prendre en compte l'homme dans la conception. Les méthodes de conception centrées sur l'homme, liées à l'usage des technologies, sont regroupées sous la dénomination « conception centrée utilisateur ».

3.2.4 La conception centrée utilisateur

La conception centrée utilisateur prend en compte les utilisateurs finaux, ici les opérateurs, tout au long du processus de conception (Nielsen, 1993; Norman, 1988). Elle postule que les utilisateurs sont les mieux placés pour guider et intervenir, et doivent être au centre de la démarche de conception, dans une approche centrée sur l'homme et ses besoins plutôt que sur les besoins technologiques. D'après la norme ISO 9241-210 (2010), les principes de la conception centrée utilisateur sont :

- la compréhension des utilisateurs, des tâches et des environnements ;
- l'implication des utilisateurs dans la conception comme source de connaissances et pour évaluer des solutions ;
- l'évaluation centrée sur l'utilisateur ;
- le caractère itératif du processus de conception ;
- la prise en compte de l'intégralité de l'expérience utilisateur (toutes phases de vie, modes de fonctionnement, caractéristiques personnelles) ;
- la constitution d'une équipe de conception pluridisciplinaire.

Les intérêts d'une conception centrée utilisateur pour un système sont décrits dans la norme ISO 9241-210 (2010). Ils comprennent l'augmentation de la productivité et de l'efficacité, la facilitation de la compréhension et de l'utilisation, et donc de la formation, l'amélioration de l'utilisabilité et l'accessibilité, le renforcement de l'expérience des utilisateurs, la réduction de l'inconfort et du stress, et donc un progrès pour la santé et le bien-être. La norme décrit également le cycle itératif de conception centrée utilisateur en quatre étapes principales (cf. Figure 40).

La première étape est la compréhension et la spécification du contexte d'utilisation (1), c'est-à-dire la prise en compte des utilisateurs et parties prenantes (leurs caractéristiques et leurs objectifs) et des environnements d'utilisation (technique, physique, social et culturel).

La deuxième consiste à spécifier les exigences utilisateur (2), incluant le contexte d'utilisation, les besoins de l'utilisateur, les connaissances/normes/directives pertinentes, l'utilisabilité et l'organisation du travail.

Ces deux premières étapes constituent la spécification fonctionnelle.

⁶⁶ Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et en Sécurité du Travail.

La troisième étape est la production des solutions de conception (3), qui comprend deux sous-étapes intimement imbriquées l'une dans l'autre. La conception satisfait aux exigences de l'utilisateur, en identifiant les tâches et sous-tâches et leur allocation à l'utilisateur et à d'autres parties du système. La conception et sa formalisation (sa matérialisation à l'aide de scénarios, de simulations, de modèles, de maquettes, de prototypes) sont indissociables, et mises en œuvre conjointement.

Enfin, la quatrième étape vise à évaluer la conception (4) pour collecter de nouvelles informations sur les besoins des utilisateurs, fournir un feedback sur les avantages/inconvénients des solutions, vérifier la satisfaction des exigences des utilisateurs, et comparer les options de conception. Pour évaluer la conception, il y a deux grands types d'approches : les essais utilisateur et l'évaluation fondée sur l'inspection à partir de lignes directrices ou d'exigences sur l'utilisabilité (évaluation faite par des experts en utilisabilité).

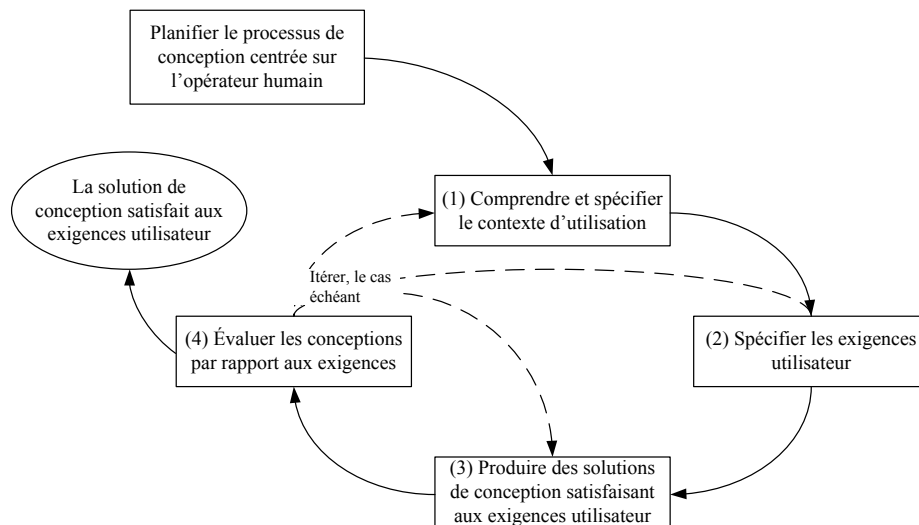


Figure 40 : Cycle itératif de la conception centrée utilisateur de la norme ISO 9241-210 (2010)

Pour les « essais utilisateur », il convient de déterminer des critères d'évaluation, une méthode, puis d'évaluer le respect ou non des critères en suivant la méthode (NF EN 614-2+A1, 2008). En fonction du besoin, une ou plusieurs des méthodes ci-après peuvent être employées : discussions de groupe, entretiens, questionnaires, listes de contrôle, études d'observation, analyse des accidents importants et évaluations psychométriques.

Il existe différentes normes et méthodes qui donnent des recommandations aux concepteurs pour évaluer avec expertise les conceptions, sur la base d'une conception centrée utilisateur (NF EN 614-1+A1, 2009; NF EN 614-2+A1, 2008; Nielsen & Molich, 1990; Scapin & Bastien, 1997; Shneiderman, 1986). Puisqu'elles sont détaillées plus longuement dans la thèse de Roche (2015), nous ne les discuterons pas plus en détail dans cette thèse.

Boy (1998) résume l'objet de la conception centrée utilisateur à l'Artefact⁶⁷, l'Utilisateur, la Tâche, et l'Organisation (pyramide AUTO), sans oublier leurs interconnexions. Il a par la suite ajouté le S pour désigner la Situation (Boy, 2003). Toutes ces dimensions doivent être prises en compte dans une conception itérative des outils et des usages.

Si nous reprenons notre modèle du système cobotique en miroir du modèle AUTOS de Boy, on s'aperçoit que les visions sont très proches (cf. Tableau 17).

⁶⁷ Pour la cobotique, l'artefact désigne le dispositif technique, c'est-à-dire le système robot.

	<i>Organisation</i>	<i>Tâche</i>	<i>Situation</i>	<i>Artefact</i>
<i>Utilisateur</i>	Social (<i>environnement social</i>)	Analyse de l'activité (<i>opérateur</i>) et de la tâche (<i>tâche</i>)	Conscience de la situation (<i>l'opérateur dans la dynamique de la situation</i>)	Ergonomie, formation (<i>système robot avec l'interface et expertise de l'opérateur</i>)
<i>Organisation</i>	-	Analyse des métiers et des rôles (<i>organisation et expertise opérateur- robot pour réaliser la tâche</i>)	Coopération et coordination (<i>organisation opérateur-robot pour la tâche</i>)	Émergence, évolution (<i>globale de l'ingénierie à l'utilisation</i>)
<i>Tâche</i>	-	-	Action située (<i>l'opérateur dans la dynamique de la situation</i>)	Exigences techniques et organisationnelles (<i>tâche</i>)
<i>Situation</i>	-	-	-	Utilité et utilisabilité (<i>système robot</i>)

**Tableau 17 : Croisement de la pyramide AUTOS (Boy, 2003)
avec le système cobotique (en italique)**

Boy (2009), avec son modèle de conception de l'« orchestre » (*Orchestra Model*), propose une approche d'ingénierie basée sur les scénarios et développée à partir du savoir et du savoir-faire des experts. Ainsi, on laisse aux opérateurs, devenus « musiciens », la « partition » (travail prescrit) nécessaire et la « liberté » (marge de manœuvre) suffisante à l'expression musicale en « orchestre » (régulations des situations réelles). Le modèle de l'orchestre comprend :

- la théorie musicale : vocabulaire, contexte, ensemble de connaissances qui permettent aux agents de se comprendre ;
- les partitions : rôles prescrits de chaque agent et des interactions prescrites entre agents ;
- les compositeurs : organisent et ajustent les rôles des agents et leurs interactions ;
- le chef d'orchestre : réassigne les fonctions/rôles aux agents pour répondre aux contraintes réelles, notamment des contraintes temporelles et de timing ;
- les musiciens : sont compétents pour réaliser leurs tâches, répondre à leurs fonctions, mais comprennent également suffisamment les autres agents pour, dans l'idéal, avoir une compréhension commune de la situation. Ils peuvent avoir besoin de médiation ou d'être supervisés si leur représentation de la situation est insuffisante.

Suivant ce modèle, le robot est un « agent artificiel » auquel on peut également laisser de la marge de manœuvre malgré ses propriétés singulières comparées à celles d'un « agent humain ».

La conception centrée opérateur semble tout à fait répondre au besoin d'une meilleure intégration de l'homme dans la conception, en spécifiant ses besoins et ses attentes et en concevant et évaluant avec lui les solutions techniques dans une démarche itérative. Seulement, sa mise en œuvre dans l'industrie n'est pas triviale, c'est pourquoi nous nous appuyons sur les théories et pratiques de l'ergonomie pour dégager une conduite de projet compatible avec la conception centrée utilisateur. Nous en précisons ensuite les deux phases clés qui sont l'analyse de l'activité et les simulations.

3.3 L'opérateur dans la conception

3.3.1 Conduite de projet et ergonomie

Selon Daniellou (2004), dans un projet industriel, on retrouve classiquement les 5 étapes suivantes⁶⁸ :

1. « Les études préliminaires, conduites par une équipe très restreinte, évaluent approximativement le coût du projet et sa viabilité économique. Pour ce faire, des hypothèses sont émises (notamment en matière d'effectifs), qui reposent sur très peu d'information fiable, mais qui vont conditionner toute la suite du projet.
2. Les études de base, effectuées par la Maîtrise d'Œuvre, débouchent sur les cahiers des charges qui serviront à la consultation des fournisseurs. Dans le domaine industriel, il est habituel que la puissance d'études des fournisseurs soit utilisée, et que le système ne soit pas entièrement défini quand les fournisseurs sont consultés. Au cours de cette étape, le « feu vert » stratégique est donné au projet.
3. Les études de détail visent à définir chaque composante du système avec un degré de précision qui permette sa réalisation. Elles se caractérisent par la diversité des spécialités de conception travaillant en parallèle, avec en conséquence un risque de dispersion et d'incohérence.
4. Le chantier constitue le moment de réalisation matérielle des solutions retenues. Il se déroule pour partie sur le site concerné, mais également chez les fournisseurs (assemblage des machines). Il est suivi des essais des différents dispositifs.
5. Le démarrage est le moment où l'on cherche à commencer à produire, il s'étend jusqu'à ce que le fonctionnement nominal soit atteint. »

Bien que la présentation des étapes donne l'impression qu'elles s'enchaînent de manière linéaire, il est fréquent que l'on assiste à des retournements de situation qui réorientent le projet de façon imprévue (Jackson, 1998).

Les défaillances souvent rencontrées dans la conduite de projet sont dues à (Barcellini, Van Belleghem, & Daniellou, 2013) :

- sa structure : faiblesse du pilotage, faiblesse de la présence de responsables d'exploitation, sous-estimation des dimensions liées aux caractéristiques de la population de travail/surestimation de l'importance des dimensions techniques, absence d'interactions entre définition et recherche de solution, mauvaise consultation des instances représentatives du personnel, ou découverte tardive du projet par les opérateurs ;
- et/ou à l'insuffisante prise en compte du travail humain, des régulations mises en œuvre par les opérateurs pour faire face aux variabilités.

En particulier, il est fréquent que le projet soit dirigé par une solution technique (Garrigou, Thibault, Jackson, & Mascia, 2001) et ne convienne donc pas aux besoins et attentes des opérateurs. Il est alors d'autant plus difficile d'anticiper l'impact des dimensions sociotechniques du projet.

La compréhension de l'homme au travail est par ailleurs un facteur crucial pour la coopération homme-machine. Ainsi, avant de parler de coopération homme-machine, Hoc (2001) préfère évoquer la coopération concepteur-opérateur qui doit selon lui évidemment la précéder.

⁶⁸ Les termes désignant les étapes varient selon les entreprises et les auteurs.

Pour pallier ces difficultés, l'approche doit donc 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 (Barcellini, Van Belleghem, & Daniellou, 2013).

On ne peut pas prévoir en détail l'utilisation qu'un opérateur fera d'un système. En revanche, les choix de conception déterminent les possibilités et impossibilités de l'activité future (Daniellou, 2004). L'objectif des simulations, c'est-à-dire de l'analyse de l'activité future, est d'évaluer les choix de conception, qui doivent permettre la mise en place de tactiques compatibles avec les situations retenues. Ce n'est pas de prédéterminer la bonne façon de faire, mais de rendre possibles certains modes opératoires et d'en interdire d'autres, en donnant à l'opérateur une marge de manœuvre suffisante pour réguler les variabilités réelles.

Avec l'avancement du projet, le détail de la solution et la connaissance des besoins futurs (fonctions) augmente, et la marge de manœuvre/créativité diminue (jusqu'à la phase de réglages). L'analyse de l'activité et les simulations permettent de maximiser les connaissances des besoins et le détail de la solution lorsque la marge de manœuvre est la plus importante. Le constat d'une nécessité d'échanges entre parties prenantes du projet n'est pas nouveau (Midler, 1998), mais déterminant pour comprendre l'intérêt de connaître les besoins (notamment par l'analyse de l'activité) et les solutions potentielles (notamment par l'état de l'art robotique/cobotique) le plus tôt possible dans le projet.

Les deux éléments méthodologiques-clés de l'ergonomie pour la conduite de projet sont l'importance de l'analyse du besoin, traitée dans la section ci-dessous, et celle des simulations participatives, qui seront abordées en suivant.

3.3.2 Méthode de gestion de projet

Il existe une longue littérature sur les méthodes de gestion de projet. C'est en effet un domaine largement développé en sciences du management ou en ingénierie de projet. Ici, nous n'aborderons pas les différentes méthodes de gestion de projet et nous limiterons à décrire la conduite de projet utilisée à Safran Group et Ariane Group, et qui a été préconisée par l'industriel.

La méthode de gestion de projet adoptée par le groupe Safran est la méthode PROMPT⁶⁹, qui contient 13 jalons (numérotés de S0 à S12). Nous ne retenons ici que les étapes de conception (jalons S3 à S8), suivant le cadrage (S0 à S2) et précédant l'exploitation (S9 à S12), et les renommons de J1 à J6, conformément au guide pratique Safran Group (Thibault, 2017) :

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

Cette méthode de conduite de projet a été récemment complétée avec des jalons et livrables intermédiaires issus de l'ergonomie. La démarche résultante est représentée sur la Figure 41.

⁶⁹ Project Reporting, Organization & Management Planning Technique (PROMPT) est une méthode de gestion de projet datant des années 70.

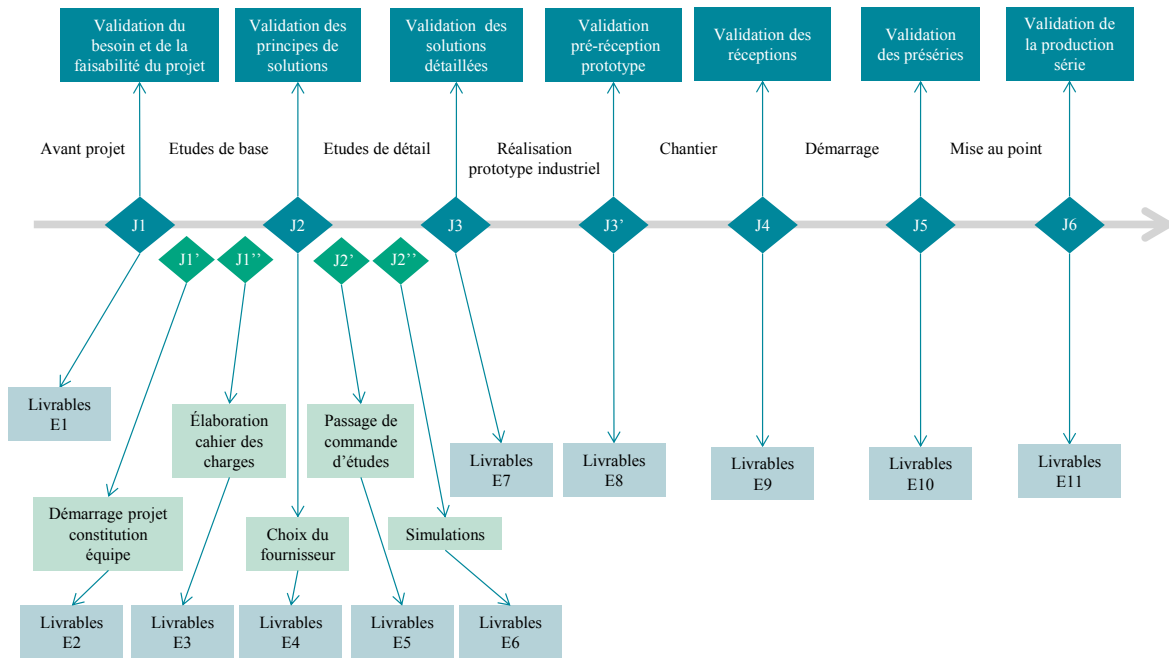


Figure 41 : Schéma de la conduite de projet PROMPT Safran Group complétée avec des jalons et livrables intermédiaires d'ergonomie (Thibault, 2017)

Chacun des jalons représenté dans le schéma correspond à un livrable, les livrables sont listés dans le Tableau 18.

Les apports du Programme Ergonomie à la conduite de projet sont notables et centrés sur l'activité de l'opérateur, ses besoins, capacités et limites, et son intégration à la conception. Nous retiendrons donc cette conduite de projet qui est un cadre, compatible avec les méthodes centrées humain.

À Ariane Group, la conduite de projet est moins structurée. En revanche, la démarche adoptée par les chefs de projet se base sur (1) une Analyse Fonctionnelle et une Spécification Technique du Besoin (communément appelées AF et STB), pour réaliser (2) une consultation, (3) suivre l'étude du fournisseur choisi, (4) recevoir préalablement la solution technique chez le fournisseur, et enfin (5) recevoir la solution sur site. Cette deuxième démarche peut être assimilée à une version simplifiée de la première à laquelle il manque une dernière étape de retour d'expérience. L'approche adoptée avec la conduite de projet Safran est donc tout à fait applicable à Ariane Group.

	<i>Jalon de validation</i>	<i>Exemples de livrables en ergonomie</i>
<i>J1</i>	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)
<i>J1'</i>	Démarrage du projet et validation d'une équipe projet	Ressources en ergonomie identifiées et missionnées par rapport à l'équipe projet
<i>J1''</i>	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, etc.)
<i>J2</i>	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
<i>J2'</i>	Validation fournisseurs et lancement des études de détails	Check-list afin de pointer l'ensemble des attendus
<i>J2''</i>	Validation des simulations	Simulations des activités futures, pronostic d'évaluations des risques avec la participation des futurs utilisateurs (production, maintenance, etc.)
<i>J3</i>	Validation des solutions détaillées	Check-list et pronostic d'évaluations des risques
<i>J3'</i> <i>et</i> <i>J4</i>	Validation des pré-réceptions et réception	Prototypage/test utilisateurs, pronostic d'évaluations des risques
<i>J5</i>	Validation des préséries	Analyse des activités de travail avec les nouvelles installations. Formation et validations des exigences
<i>J6</i>	Validation de la production série	Évaluation définitive des risques et formalisation d'un retour d'expérience (Bonnes Pratiques)

Tableau 18 : Les jalons de la conduite de projet PROMPT et les livrables associés (Thibault, 2017)

3.3.3 Analyse et formalisation de l'activité

3.3.3.1 Analyse de l'activité

Comme nous l'avons indiqué au deuxième chapitre (cf. 2.1.1), l'ergonomie, discipline s'intéressant à l'homme au travail, est centrée sur l'activité de travail de l'opérateur. Pour appréhender l'expertise des opérateurs, nous avons donc employé une démarche largement utilisée en ergonomie : l'analyse de l'activité. Pour rappel, l'activité s'oppose à la tâche (travail prescrit), puisqu'elle s'intéresse au travail réel, aux actions mises en œuvre pour réaliser la tâche. L'analyse de l'activité, bien que centrée sur l'activité réelle des opérateurs, doit prendre en compte la tâche, le contexte du travail, indissociable de l'analyse (Clot, 1999).

Plusieurs situations de référence peuvent être prises en compte dans la conception. L'analyse d'un système de travail présente un intérêt (Daniellou, 2004) :

- s'il a les mêmes fonctions que le système envisagé : par exemple, en général, la situation existante en début de projet, qui permet d'obtenir les variabilités à ne pas sous-estimer ;

- s'il présente quelques caractéristiques techniques ou organisationnelles similaires au futur système, ce qui permet d'obtenir des variabilités liées à la technologie ou aux formes organisationnelles retenues ;
- s'il présente un contexte similaire à l'activité future envisagée : géographique, anthropologique, lieu d'implantation.

Suivant leur importance et les ressources disponibles, elles sont analysées par de simples visites, des entretiens, sur documents et/ou par de véritables analyses de l'activité. L'analyse de l'activité dont il est question ici est menée soit sur l'activité existante, lorsqu'elle existe et est accessible, soit sur une activité se rapprochant au maximum de l'activité envisagée.

Le travail peut être observable, se situant alors au niveau opérationnel (la manipulation d'un outil par exemple). Il peut également être non observable, accessible uniquement par l'opérateur lui-même, se situant alors au niveau tactique, voire au niveau stratégique, lors de la redéfinition de la tâche. Ce pan de l'activité est inaccessible sans l'implication de l'opérateur dans l'analyse. Pour analyser l'activité non observable, il faut accompagner l'opérateur dans le procédé de verbalisation de son activité cognitive⁷⁰, basée sur ses habiletés, sur règles ou connaissances (*skill-based*, *rule-based* et *knowledge-based behavior*). Les connaissances issues de la mémoire à long terme et mobilisées pour réaliser la tâche doivent également autant que possible être récoltées. Il s'agit des concepts, des phénomènes, des situations exceptionnelles vécues, etc. Pour cela, la verbalisation peut être anticipée (pour guider l'analyse, récolter des événements exceptionnels, le contexte du travail), simultanée (en situation, plus proche de l'activité) ou consécutive (souvent lors d'auto-confrontations basées sur un support résultant de premières analyses) à l'activité de travail.

Daniellou et Béguin (2004) distinguent l'analyse du travail, précise, performante, mais chronophage, de l'utilisation d'une grille d'analyse⁷¹ qui peut être utile lorsque le temps à y consacrer est réduit. Alors, il faut identifier les faits objectifs (mauvaise qualité de la matière première par exemple) et les visions des acteurs, parties prenantes du projet (l'idée qu'il est indispensable d'utiliser cette matière première).

L'analyse de l'activité permet de dégager des repères pour la conception (Garrigou, Thibault, Jackson, & Mascia, 2001). Ils sont descriptifs (concernant les équipements, espaces de travail et l'organisation), prescriptifs (imposant le respect de principes ou de normes), ou procéduraux (pour préparer la suite de l'intervention) (Daniellou, 2004). Les repères sont ensuite traduits par des analyses fonctionnelles expliquant les besoins pour les situations de travail futures.

Le questionnement de l'opérateur (Daniellou & Béguin, 2004) peut se faire en situation, lorsque celui-ci mobilise ses compétences pour réaliser son activité. Cela permet de le questionner sur son savoir-faire intégré, implicite, difficilement accessible lorsqu'il est déconnecté de son activité de travail. Il peut, pour obtenir des données sur des événements rares que l'on n'a pas eu l'occasion d'observer, avoir lieu de façon différée. Pour cela, il faut mettre l'opérateur en situation, en respectant le fil chronologique. On peut également explorer les modalités sensorielles qui servent l'activité, par exemple les indices visuels, sonores, les sensations et la façon dont elles sont exploitées.

Lors des observations libres, l'ergonome s'entretient avec les opérateurs et les observe dans leur situation de travail, à la recherche d'écarts entre les descriptions/prescriptions et la réalité (Daniellou & Béguin, 2004). Il s'intéresse aux variabilités industrielles et aux réponses apportées par les opérateurs, à l'utilisation qu'ils ont des outils, aux résultats du travail, aux produits et déchets. Ces

⁷⁰ Une description de l'activité cognitive de l'opérateur est proposée au 2.1.1.

⁷¹ La grille d'analyse peut être générique (peu fiable et d'efficacité douteuse) ou produite *ad hoc* à partir de familles de situations.

observations aboutissent à un prédiagnostic, qui met en relation des déterminants, l'activité et ses conséquences.

Les observations systématiques utilisent les hypothèses formulées dans le prédiagnostic, l'observateur cherche à les valider/invalidier. Les résultats sont ensuite présentés à l'opérateur (qui s'approprie alors une nouvelle description de leur activité) pour enrichir et valider l'interprétation lors de débriefings. Le diagnostic sera ensuite diffusé dans l'entreprise.

Filippi et al. (1995) formulent des hypothèses de travail pour l'observation, suivant le type d'action observé :

- lorsque les actions sont significatives pour les opérateurs, qu'ils sont en mesure de les raconter et de les commenter, il faut réaliser des entretiens avec eux ;
- lorsque les actions sont sociales, un opérateur n'est que très rarement seul, il peut à tout moment communiquer avec ses collègues, il faut observer ces communications ;
- lorsque les actions s'organisent dynamiquement, elles ne sont pas isolées mais intégrées dans un processus global, il faut observer l'activité en continu ;
- lorsque les actions s'accompagnent de phénomènes cognitifs, qu'elles sont liées aux raisonnements et aux prises de décision des opérateurs, il faut observer et organiser des débriefings pour comprendre les interprétations, sentiments, raisonnements, habiletés des opérateurs.

Nous l'avons vu, l'analyse de l'activité réelle est déterminante pour sa transformation. Pour la compléter, Vicente (1999) propose d'analyser d'autres contraintes que celles données par l'activité actuelle, qui sont les fonctions inexplorées pouvant permettre de réaliser la tâche (cf. Figure 42). Cette vision repose sur deux visions complémentaires : la vision « écologique », qui analyse les contraintes intrinsèques, le domaine de travail ; et la vision « cognitive », centrée sur l'expertise individuelle. Ces deux visions sont reliées par 3 dimensions intermédiaires : les objectifs à atteindre, les stratégies pour les atteindre et les dimensions sociales et organisationnelles (cf. Figure 43). L'analyse du contexte de l'activité et de situations de références supplémentaires en ergonomie, et l'expertise technique/technologique correspondent à ce complément nécessaire à une analyse globale du problème.

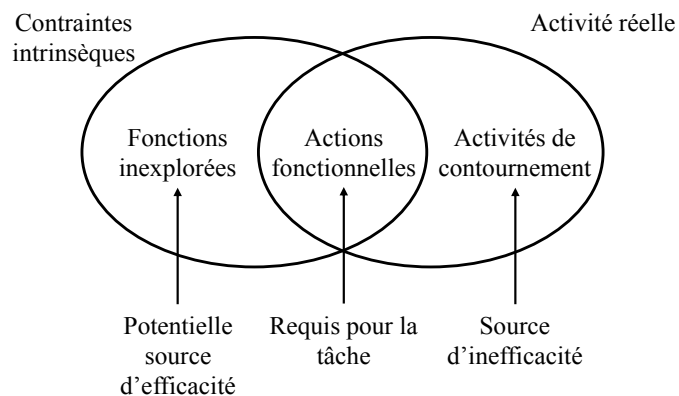


Figure 42 : Activité réelle et contraintes intrinsèques de la tâche (Vicente, 1999)

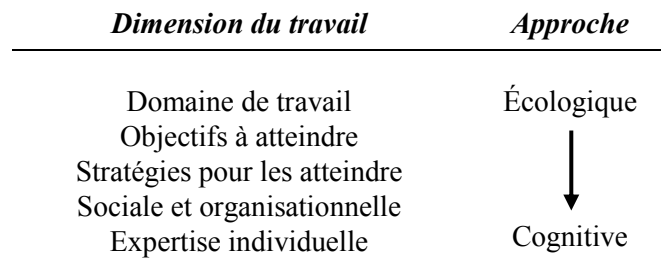


Figure 43 : Les cinq dimensions du travail : de l'approche écologique à l'approche cognitive (Vicente, 1999)

L'observation et la compréhension de l'activité de travail n'est pas suffisante pour la conception. Les données recueillies doivent être modélisées pour être transmises, réutilisées, sauvegarder. Pour cela, une méthode de formalisation de l'activité de l'opérateur est nécessaire.

3.3.3.2 Formalisation grâce à la méthode MASK

Basé sur la méthode MKSM (Ermine, Chaillot, Bignon, Charreton, & Malavieille, 1996a), la méthode MASK⁷² (Ermine, Chaillot, Bignon, Charreton, & Malavieille, 1996b) cherche à modéliser la connaissance d'un expert, en structurant les informations selon plusieurs angles. En effet, cette méthode propose des modèles, des concepts, des phénomènes, des processus, des tâches, et des activités (Le Bellu, 2011), qui facilitent la structuration de la connaissance dans une démarche d'ingénierie, avec une approche systémique, ergo-cognitive, psycho-cognitive et historique (Ermine, 2000). Elle permet d'étudier en profondeur la connaissance des experts et permet de réduire l'écart entre documentation et travail réel, en l'abordant suivant différents points de vue.

Pour expliquer plus précisément le fondement théorique de la méthode MASK, nous décrivons ici le « microscope des connaissances », outil qui permet d'analyser la connaissance. Inspiré du microscope de De Rosnay (1975), Ermine (2001) décrit les deux axiomes sur lesquels se base MASK. L'axiome sémantique définit la connaissance comme étant un système contenant des informations porteuses de sens en fonction du contexte dans lequel elle se situe (cf. Figure 44). L'axiome systémique, propose d'étudier les sous-systèmes de la connaissance que sont l'information, le sens et le contexte selon leur structure, leur fonction et leur évolution.

⁷² Le sigle MASK signifie Method for Analysing and Structuring Knowledge. Il existe d'autres méthodes de formalisation de la connaissance comme KOD ou CommonKADS (Le Bellu, 2011), qui n'ont pas été étudiées dans cette thèse.

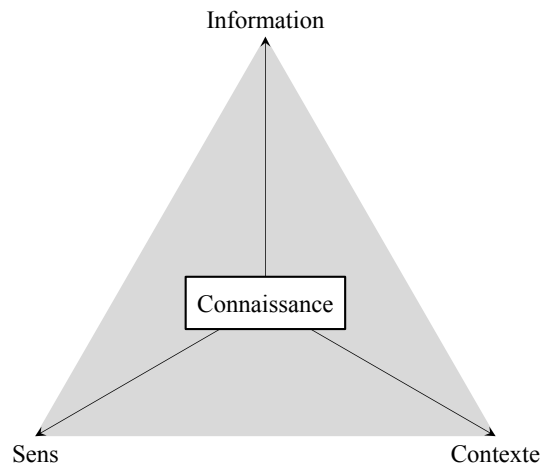


Figure 44 : Le macroscopie de la connaissance d'après Ermine (2001)

La méthode MASK vise à modéliser la connaissance dans sa globalité, ses composantes implicites et explicites, par la réalisation de modèles à partir d'entretiens (Le Bellu, 2011). Comme Lini (2013) dans sa thèse d'ingénierie cognitive, nous cherchons à construire un modèle exploitable de l'activité réelle de l'opérateur, nous utiliserons donc également cette méthode pour notre approche d'ingénierie d'un système cobotique. MASK présente par ailleurs deux autres avantages : la modélisation résultante est simple à modifier et à mettre à jour (Matta, Ermine, Aubertin, & Trivin, 2001), et elle contribue à la gestion du capital intellectuel de l'entreprise (Aries, Le Blanc, & Ermine, 2008).

Nous avons donc provoqué deux séries d'entretiens (exploratoires puis d'explicitation) appuyés par une formalisation des connaissances des opérateurs dans des diagrammes adaptés de la méthode MASK pour simplifier leur mise en œuvre dans le temps imparti du projet. Nous avons mis au point des diagrammes de trois types :

- un diagramme des concepts : carte heuristique constituant le « dictionnaire » du vocabulaire officiel et argotique relatif au poste de travail ;
- un diagramme des tâches/activités, fusion du diagramme de tâches et du diagramme d'activités : carte heuristique détaillant au maximum le travail réel des opérateurs, les régulations des variabilités, les différentes stratégies, tactiques et opérations pour réaliser la tâche, prenant en compte le poste avant l'arrivée de la cuve jusqu'à après son départ ;
- des diagrammes des phénomènes : diagrammes expliquant les phénomènes-clés (physiques, chimiques, mécaniques, etc.) indispensables à la réalisation de la tâche.

Les diagrammes des concepts et des phénomènes permettent de résumer les connaissances sémantiques utiles à l'opérateur dans son activité. Le diagramme des tâches/activités capitalise les raisonnements des opérateurs, quels que soient leur niveau sur les échelles⁷³ de Rasmussen (1983) et de Michon (1979). Le savoir épisodique est recueilli lors des entretiens, certaines expériences pouvant être retranscrites dans le diagramme des tâches/activités si elles sont jugées utiles pour l'activité. De cette façon, le fonctionnement cognitif de l'opérateur présenté au 2.1.1 est étudié.

Pour les projets en cobotique, il peut être envisagé en début de projet de réaliser une analyse succincte en raison de contraintes du projet (durée ou budget par exemple). Cependant, le besoin de transformer l'activité, et donc de la comprendre de façon détaillée, rend indispensable une analyse plus complète de l'activité de travail.

⁷³ Voir plus de détails sur la cognition de l'opérateur au 2.1.1.

3.3.4 Simulations

3.3.4.1 Généralités sur les simulations

Dans la conception, la difficulté n'est pas simplement de décrire une fonction cognitive existante, mais de comprendre les fonctions cognitives qui vont émerger au cours de situations futures (Boy & Schmitt, 2012). L'étude de telles fonctions est rendue possible par les simulations.

D'après Thibault (1998), la simulation est « une expérimentation sur un modèle qui permet de décrire un phénomène, pronostiquer des évolutions possibles et construire des connaissances ». Elle apparaît pour faire le lien entre d'une part l'analyse du poste actuel et de l'activité des opérateurs et d'autre part le futur système de production. Son rôle est de tester des hypothèses de conception, à la fois sur le fonctionnement nominal, mais aussi sur les modes transitoires (nettoyages annexes, maintenances, etc.) et les cas dégradés (manque de matériel, matériel défectueux, etc.), et ce en prenant en compte des variables techniques et humaines sur le système cobotique.

Ainsi, la simulation a pour objectifs (Daniellou, 2007) : de diagnostiquer de futures erreurs possibles, d'analyser les processus cognitifs lors de situations difficilement observables en réalité, et de former les opérateurs (Pastré, 2005). L'activité réelle des utilisateurs ne doit pas être prévue. Le but de la simulation n'est pas de prescrire la « bonne façon » d'effectuer les tâches, mais d'estimer les formes potentielles d'activité future et de vérifier leur acceptabilité.

Maline (1994) distingue quatre phases dans la démarche de simulation : une analyse préalable, l'élaboration des conditions nécessaires à la simulation, la réalisation des simulations et les pronostics/repères pour la conception. Barcellini et al. (2013) replacent ces étapes de simulation au centre du projet de conception, dont la démarche est déclinée en trois étapes : l'analyse, la simulation, et l'accompagnement. La simulation se base largement sur l'analyse, à la fois pour diagnostiquer et évaluer le besoin, et pour nourrir les scénarios d'action. La simulation réunit les parties prenantes du projet pour concevoir et évaluer les scénarios de prescription et d'action, comme cela est illustré Figure 45. Enfin, lorsque la conception est validée, le projet se poursuit jusqu'à la réalisation. Simuler permet ainsi de développer l'activité future des opérateurs, de leur encadrement, des concepteurs, des décideurs, et des instances représentatives du personnel (Barcellini, Van Belleghem, & Daniellou, 2013).

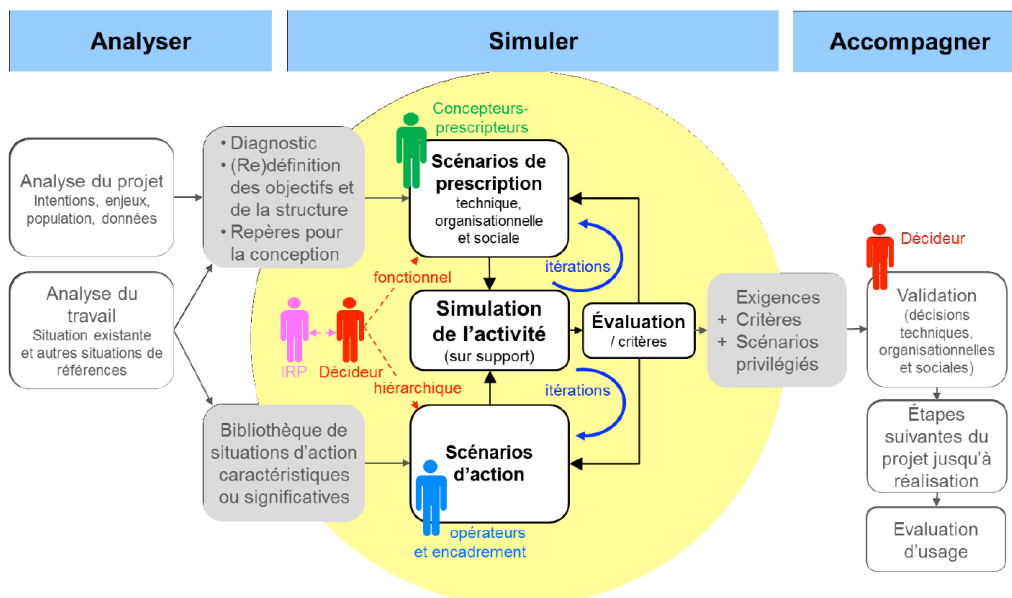


Figure 45 : La simulation participative comme opportunité de développement (Barcellini, Van Belleghem, & Daniellou, 2013)

De la même façon, Garrigou et al. (2001) décrivent la simulation comme la rencontre des approches descendantes (issues de connaissances expertes) et ascendantes (issues de l'analyse de situations réelles), pour produire des pronostics sur des difficultés que les opérateurs pourraient rencontrer dans leur activité futures (cf. Figure 46).

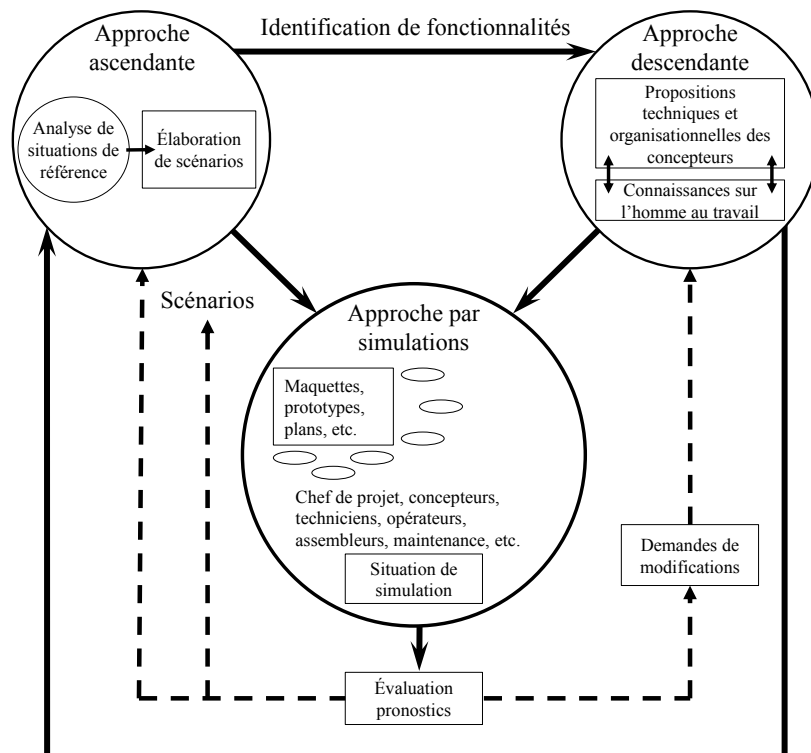


Figure 46 : L'approche par simulations, rencontre des approches ascendantes et descendantes (Garrigou, Thibault, Jackson, & Mascia, 2001)

3.3.4.2 Les méthodes de simulation

Les opérateurs participent plus ou moins à la conception par l'intermédiaire des simulations, ils peuvent être absents (éventuellement modélisés), participer directement à la simulation (sujets de l'expérimentation, interviewés, etc.) ou membres de l'équipe projet et impliqués dans différentes étapes (Daniellou, 2007).

Dans sa thèse d'ingénierie cognitive, Roche (2015) énumère les différentes méthodes n'impliquant pas et impliquant les utilisateurs finaux, présentés sur le Tableau 19.

<i>Méthode n'impliquant pas les opérateurs</i>	<i>Méthodes impliquant les opérateurs</i>
analyse heuristique ; ballade cognitive ; persona ; évaluation automatisée ; évaluation par expertise ; analyse de documents, rapports ; approche basée sur des modèles cognitifs de l'utilisateur ; méthode de créativité.	test utilisateurs ; tri de cartes ; entretien ; focus group ; questionnaire ; observation ; incident critique ; méthode de créativité.

Tableau 19 : Les méthodes de conception centrée utilisateur d'après Roche (2015)

Ainsi, les simulations participatives peuvent consister à mettre en situation les participants ou bien, plus simplement, à simuler oralement sous forme de *story telling* (simulation langagière). Pour ce second cas de figure, il faut veiller à la continuité chronologique (par exemple un outil ne peut apparaître dans la main de l'opérateur, il l'a forcément trouvé quelque part ; ou encore, l'opérateur ne peut pas être au point A puis directement au point B), à la continuité cognitive (par exemple comment l'opérateur sait-il que ... ? voit-il que ... ?), et enfin à la compatibilité avec les possibilités de l'opérateur (par exemple, il ne peut pas traverser l'atelier en retenant cinquante valeurs numériques) (Daniellou, 2004).

La norme ISO/TR 16982 (2002) détaille les avantages, inconvénients et contextes d'utilisation pour chacune des méthodes de simulation, en fonction :

- de l'étape du projet ;
- des contraintes du projet (délais, coût, etc.) ;
- des caractéristiques des utilisateurs (accessibles, inaccessibles, situations de handicap) ;
- des caractéristiques de la tâche à accomplir (complexité, criticité, etc.) ;
- du produit (existant, simple, complexe) ;
- de la présence de compétences en ergonomie/facteurs humains.

Cette caractérisation des méthodes de simulation peut s'avérer très utile pour choisir la ou les méthodes adaptées aux particularités d'une étape d'un projet industriel.

Thibault (1998) répertorie les différentes séries de simulations en fonction de la phase du projet dans le Tableau 20, correspondant au suivi d'une conduite de projet en ergonomie. Les simulations permettent ici l'intégration des parties prenantes dont les opérateurs dans la conception de l'avant-projet au chantier d'installation. Ainsi, les simulations à mettre en œuvre, leur niveau de détail, leur représentativité dépendent de l'étape du projet. La représentativité de la simulation est un paramètre-clé, qui doit être adapté aux hypothèses et à la phase du projet. En effet, une simulation détaillée très en amont est chronophage à mettre au point et à modifier, alors qu'une simulation superficielle en fin de projet n'apporte pas d'éléments assez précis pour la conception.

Nous verrons également les spécificités de la simulation pour la conception des systèmes cobotiques dans la section 3.4.3.

<i>Étape du projet</i>	<i>Contenu</i>	<i>Simulations</i>
<i>Avant projet</i>	Définition des objectifs Estimation des coûts Calendrier Étude des procédés disponibles Options générales process Options générales d'implantation Options générales de management Etude de rentabilité	Analyse de l'existant : – repères ergonomiques : définition des situations de travail existantes ; – sortie : hypothèses techniques et organisationnelles. Première série de simulations : – repères ergonomiques : familles de situations de travail futures ; – sortie : options techniques et organisationnelles sous forme de programme.
<i>Études de base</i>	Définition de l'implantation Définition des technologies Chiffrage/lots Demande de budget Cahier des charges fournisseurs Consultation Planification	Deuxième série de simulations : – repères ergonomiques : définition des situations de travail futures ; – sortie : choix des options d'implantations et des technologies à mettre en œuvre, élaboration du plan de formation et de l'organisation du travail.
<i>Études de détail</i>	Analyse du retour des fournisseurs Modifications/compléments au cahier des charges Commandes aux fournisseurs	Troisième série de simulations : – repères ergonomiques : préconisations relatives aux moyens de travail ; – sortie : choix définitif des équipements, agencement des postes de travail, des formations, du plan de prévention.
<i>Chantier, essais, démarrage, recette, production, bilan.</i>		

Tableau 20 : Les simulations en fonction de l'étape du projet (Thibault, 1998)

À noter qu'une modélisation technique et précise des opérateurs menée par des concepteurs experts n'est en aucun cas une garantie que le poste de travail envisagé répond au besoin, est « ergonomique ». On peut simuler une manière de travailler, mais on ne peut pas anticiper précisément la manière réelle dont la tâche sera effectuée (Daniellou, 2007). Les simulations basiques permettent d'éviter des erreurs majeures de conception, mais des modèles techniques trop sophistiqués peuvent donner l'illusion de postes de travail conçus « ergonomiquement », alors que le travail est envisagé par les concepteurs et non par les opérateurs.

3.4 Ingénierie des systèmes cobotiques

Cette partie est consacrée à l'approche d'ingénierie que nous avons développée et qui constitue une de nos principales contributions méthodologiques. Elle repose sur la gestion de projet à Ariane Group et Safran Group, et sur les méthodes de prise en compte de l'opérateur développées précédemment (cf. 3.3), en y intégrant la dimension technique de la conception plus longuement expliquée dans la thèse de Bitonneau (2018). La démarche globale adoptée est désignée « ingénierie des systèmes cobotiques ».

3.4.1 Interdisciplinarité

L'équipe choisie pour travailler sur l'ingénierie des systèmes cobotiques a été constituée par Safran Group, et les rôles ont été répartis par l'entreprise.

Globalement, l'objectif était de développer une approche de conception de systèmes homme-robot qui améliore la performance et préserve la santé des opérateurs. Les interactions homme-robot pour la collaboration sont alors centrales dans cette conception, qui doit être guidée par le besoin industriel. Elle s'appuie à la fois sur la compréhension des facteurs améliorant et diminuant la performance, et sur les objectifs et activités des opérateurs.

Pour les systèmes complexes intégrant l'homme, la conception bénéficie d'une synergie entre ergonomie et cognitive (Hoc, 1998). L'ingénierie cognitive est particulièrement appropriée ici puisque ses méthodes, outils et techniques ont vocation à guider la conception de systèmes informatiques aidant à la performance humaine (Roth, Patterson, & Mumaw, 1999). Combinée avec l'ergonomie pour l'étude de l'homme au travail et l'ingénierie robotique pour appréhender la dimension technique, elle participe à l'ingénierie du système cobotique.

Il est question ici de conception pour l'industrie, c'est pourquoi les compétences en ingénierie (ou génie industriel) ont été recherchées pour constituer l'équipe. Safran Group a donc recruté un ingénieur en cognitive et un ingénieur en robotique en thèse, épaulés par l'ergonome du groupe.

Les membres de cette équipe ne se sont pas contentés d'apporter une expertise issue de leurs domaines de compétences respectifs. Ils devaient co-construire une approche interdisciplinaire pour concevoir des systèmes cobotiques.

Ainsi, les résultats présentés dans cette thèse, et dans celle de Bitonneau (2018), ne sont pas le fruit d'une unique expertise dans un domaine, mais d'un travail interdisciplinaire sur la question de la cobotique.

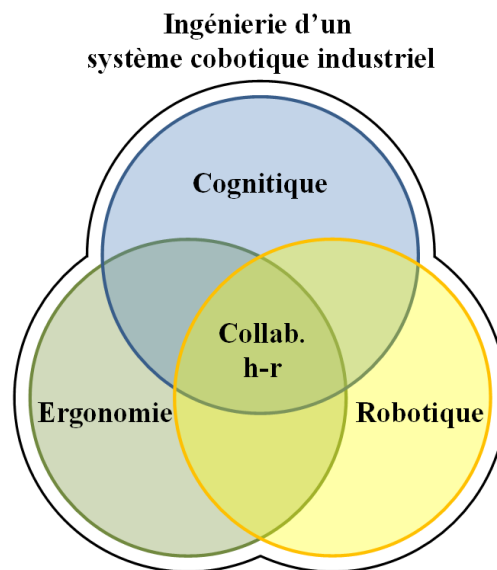


Figure 47 : Schéma de l'aspect interdisciplinaire de la conception en cobotique

3.4.2 Ingénierie des systèmes complexes

L'objet d'étude de cette thèse est le système cobotique, qui par essence est appréhendé avec une vision systémique (cf. 2.4.3). Ainsi, nous considérons le système cobotique de façon globale, ne négligeant ni sa structure interne, ni l'organisation des entités qui le composent (homme, robot et tâche) et leurs interactions, ni les régulations de perturbations (ou variabilités) internes et/ou externes, ni l'environnement. Nous éviterons donc de le réduire à trois entités distinctes pouvant être conçues séparément (approche positiviste ou réductionniste). Aussi, nous ne nous contenterons pas d'une description du système cobotique comme un tout insécable (approche holistique), conformément à la

théorie du système général exposée par Le Moigne (1977) et à la vision de la complexité de Morin (1990). Ainsi, le système peut être vu suivant deux représentations complémentaires : suivant sa structure et selon ses fonctions.

Mettant en œuvre cette approche systémique, nous porterons un intérêt tout particulier à une notion apparue avec la seconde vague de la cybernétique : l'émergence de nouvelles propriétés, l'auto-organisation, ou encore « autopoïèse » (Varela, 1996). En effet, la conception d'un système cobotique se poursuit en production, lorsque l'homme et le robot développent de nouvelles stratégies, tactiques, de nouvelles organisations pour mieux répondre à leurs contraintes internes et externes. Le système peut ainsi, notamment grâce à l'expertise de l'opérateur et à la marge de manœuvre laissée par le robot, répondre aux situations qui étaient imprévues en amont dans le projet.

L'ingénierie des systèmes complexes est désormais largement répandue et utilisée. Elle vise, selon l'International Council on Systems Engineering (INCOSE), à concevoir des solutions répondant au mieux au besoin, pour tout le cycle de vie du système et dans tous les contextes d'utilisation, en constituant des groupes de conception pluridisciplinaires⁷⁴. Pour un système cobotique, l'homme fait partie du système, et doit donc bien sûr être considéré dans la conception. Il faut concevoir des systèmes homme-machine, et non une assistance ou une alternative à l'opérateur (Hoc, 2004). La NASA, acteur historique de l'ingénierie des systèmes, décrit dans son rapport les différentes phases du projet de conception d'un système⁷⁵ (cf. Tableau 21). Ils proposent également différents outils pour prendre en compte l'homme dans la conception, et un phasage pour intégrer l'homme au système technique.

⁷⁴ Le caractère interdisciplinaire de la conception est, selon Hoc (2004), déterminant pour la réussite d'un projet.

⁷⁵ Les phases décrites dans le rapport de la NASA sont très similaires à la démarche PROMPT décrite précédemment (cf. 3.3.2).

	<i>Phase</i>	<i>Objectifs</i>	<i>Livrable</i>
<i>Formulation</i>	Pré-phase A : études de concept	Produire un large spectre d'idées et d'alternatives pour les missions, parmi lesquels de nouveaux programmes/projets peuvent être sélectionnés. Déterminer la faisabilité du système envisagé. Développer les concepts de la mission. Esquisser quelques spécifications. Identifier les besoins technologiques potentiels.	Des concepts de solutions réalistes sous forme de simulations, d'analyses, de rapports, de maquettes.
	Phase A : développement du concept et de la technologie	Déterminer la faisabilité et les attentes vis-à-vis du nouveau système. Établir la compatibilité avec les plans existants. Développer le concept final de la mission, des spécifications haut niveau et les besoins en développement technologique.	Définition d'un concept de solution sous forme de simulations, analyse, maquettes, et de définition de marché.
	Phase B : conception préliminaire et finalisation de la technologie	Définir le projet de façon suffisamment détaillée pour établir une base répondant aux besoins de la mission. Concevoir sommairement la structure de la solution.	Solution sous forme de maquettes, de résultat d'études de marché, de spécifications et de prototypes.
<i>Implémentation</i>	Phase C : conception finale	Finaliser la conception de la solution de façon détaillée. Fabriquer le matériel et développer le software.	Solution finale conçue de façon détaillée, fabrication de la solution finale et développement du software.
	Phase D : assemblage, intégration, tests et lancement	Assembler et intégrer les éléments pour mettre au point le système. Lancer et préparer des opérations. Réaliser des tests et la transition vers l'utilisation.	Système prêt à être utilisé.
	Phase E : opérations et durabilité	Conduire la mission et valider que le besoin initial correspond à la solution. Implémenter le plan de la mission.	Système correspondant au besoin.
	Phase F : clôture	Implémenter la désactivation et la cession de la mission. Réaliser des analyses des données de la mission.	Clôture.

Tableau 21 : La conduite d'un projet d'ingénierie selon la NASA (2007)

De la même façon, l'INCOSE réserve une partie aux « facteurs humains » dans ses différents guides (INCOSE, 2015). Pourtant, il est bien souvent constaté que les approches d'ingénierie des systèmes se focalisent sur la technologie (Boy & McGovern Narkevicius, 2014). Il est donc pertinent de combiner l'ingénierie des systèmes avec des méthodes issues de la conception centrée utilisateur, c'est-à-dire l'analyse du travail réel et les simulations participatives, pour veiller à la bonne intégration entre homme et système technique.

Vicente (1999) décrit deux approches de conception. Pour la première, le concepteur prescrit le travail et les opérations à réaliser pour tous les événements prévus (« contrôle centralisé »). De cette façon, les opérateurs n'ont aucune marge de manœuvre pour faire face à l'imprévu. La deuxième approche consiste à laisser à l'opérateur la marge de manœuvre⁷⁶ suffisante pour réguler les variabilités

⁷⁶ Pour Marquié (Marquié, 1995), la marge de manœuvre est « la latitude dont on dispose entre certaines limites, les possibilités d'action laissées par certaines contraintes internes et externes. Ces possibilités peuvent découler

(« contrôle distribué »). Il doit donc disposer des informations et outils adéquats pour effectuer cette régulation. Dans l'absolu, il n'y a pas un mode de contrôle à privilégier sur l'autre : pour certaines situations, il peut être préférable de contraindre fortement l'opérateur, alors que pour d'autre il sera plus opportun de lui laisser plus de liberté. Cela dépend principalement de la prédictibilité de la situation. Il est toutefois intéressant de retenir que l'on peut ainsi concevoir un système industriel plus ou moins flexible, résilient. Ces deux approches sont partagées par le Département de la défense américain, selon lequel les concepteurs doivent placer le système conçu sur le continuum reliant les systèmes automatisés aux systèmes autonomes, c'est-à-dire trouver un compromis entre l'optimalité préprogrammée et la résilience pour réaliser une tâche (US Department of Defense, 2012).

3.4.3 Simulations et systèmes cobotiques

L'importance de la simulation pour l'intégration homme-système technique a déjà été précisée (cf. 3.3.4). L'objet de cette section est de discuter des spécificités des simulations pour la conception de systèmes cobotiques.

La simulation est motivée par des objectifs de conception, déclinés en hypothèses. Puis, des scénarios basés sur des situations de référence peuvent être construits, avant de mettre au point le support de la simulation, pour ensuite simuler réellement et en tirer les conclusions pertinentes pour le projet. Les supports de simulations peuvent prendre des formes très diverses, allant du plan (croquis ou plan numérique 3D) au prototype⁷⁷, en passant par des maquettes⁷⁸ (Thibault, 2017).

Dans un système cobotique, les éléments constitutifs de la simulation sont donc la tâche (comme dans tous les systèmes de travail), l'homme (de préférence présent, mais pouvant être simulé) et le robot⁷⁹, dans leur environnement. La simulation vise une anticipation du fonctionnement, des interactions et de l'organisation de ces éléments dans le système.

En robotique, il existe des outils numériques avancés pour simuler l'opérateur et son comportement (Oborski, 2004; Schröter, Kuhlang, Finsterbusch, Kuhrke, & Verl, 2016). Ces outils peuvent être utiles dans un premier temps, mais ne remplacent en aucun cas des simulations auxquelles les opérateurs participent en amenant leur expertise, leur besoin, leur façon de travailler et leur point de vue sur la solution envisagée. De plus, les mannequins numériques ont le comportement qui a été prévu par les concepteurs, et il diffère toujours de l'activité réelle des opérateurs (cf. 3.3.4).

Les simulations permettent également d'évaluer un paramètre critique dans les systèmes cobotiques : l'acceptation du futur poste par l'opérateur. Weistroffer (2015), dans sa thèse, liste plusieurs moyens d'évaluer l'acceptabilité :

- en situation réelle⁸⁰ pour une interaction forte et pour être très proche de la configuration future envisagée, mais long, coûteux à mettre en œuvre et à modifier, et peu flexible ;
- en situation enregistrée à l'aide d'images ou de vidéos (Woods, Walters, Koay, & Dautenhahn, 2006) ;

d'une atténuation des contraintes elles-mêmes et d'une meilleure utilisation des marges de liberté qu'elles laissent », cité par Coutarel (2004) dans son chapitre sur les marges de manœuvre au travail.

⁷⁷ Dans notre contexte, le terme « prototype » désigne un modèle physique fonctionnel ou partiellement fonctionnel du futur système de travail.

⁷⁸ Une maquette est ici une réplique physique ou numérique non fonctionnelle du futur système de travail.

⁷⁹ La simulation du robot et son comportement sont spécifiquement traités dans la thèse de Bitonneau (2018).

⁸⁰ Cela peut être fait pour évaluer des briques technologiques (Helms, Schraft, & Hagele, 2002; Schraft, Meyer, Parlitz, & Helms, 2005), ou pour évaluer les interactions homme-robot, la sécurité perçue d'un robot (Karwowski & Rahimi, 1991) ou les réactions physiologiques d'un utilisateur face à un robot (Kulic & Croft, 2007) par exemple.

- en utilisant la réalité virtuelle ou augmentée, principe dont Weistroffer (2015) a démontré l'intérêt.

Par ailleurs, une bonne représentation de la situation pour l'homme et pour le robot est déterminante pour permettre l'autorégulation du système homme/machine (Leplat, 2006). En effet, Drury et al. (2003) ont constaté pour une opération de *Search and Rescue* réalisée par hommes et robots en collaboration, que tous les incidents critiques observés étaient issus d'une mauvaise conscience réciproque homme-robot. Même les opérateurs les plus experts peuvent prendre de mauvaises décisions si leur conscience de la situation est incomplète ou imprécise. À l'inverse, un opérateur avec une parfaite représentation de la situation peut également prendre de mauvaises décisions (dû à un manque de formation, de mauvaises stratégies, etc.) ou faire preuve d'une faible performance du fait de son impossibilité à conduire les actions appropriées (Endsley, 1995). Dans la collaboration avec le robot, il faut donc veiller à ce que l'opérateur ait conscience des propriétés du robot : ses objectifs, ses capacités/limites, ses caractéristiques mécaniques, etc. Le robot, quant à lui, doit avoir en quelque sorte conscience des propriétés de l'homme : là où il est susceptible de faire des erreurs, ses caractéristiques physiques, les risques pour sa santé, etc.

Les différentes métriques pour la mesure de l'interaction homme-robot sont résumées dans plusieurs études (Steinfeld, et al., 2006; Ogorodnikova, 2008; Olsen & Goodrich, 2003; Scholtz, Antonishek, & Young, 2004; Bethel, Salomon, Murphy, & Burke, 2007; Angeles & Park, 2007).

Le type de système cobotique retenu dans le projet industriel va influencer directement le contenu des hypothèses de simulation, nous les traiterons donc séparément dans les sous-sections suivantes. Étant considérée comme insuffisamment mature pour l'industrie et sans retour d'expérience, l'exomanipulation n'a pas été traitée dans cette partie.

3.4.3.1 Colocalisation collaborative

Lors de colocalisation collaborative, l'opérateur et le robot travaillent dans le même espace de travail sans séparation matérielle.

Les premières dimensions à prendre en compte lors de la conception d'un robot colocalisé avec un opérateur sont la performance, la sécurité et l'acceptabilité. Dans un contexte industriel, le système doit bien sûr répondre aux besoins en termes de performance, et ce malgré les dispositifs de sécurité intégrés au robot (vitesse et efforts limités, détection de l'opérateur, etc.). La sécurité, quant à elle, peut être traitée à l'aide d'analyses de risques enrichies par les simulations, qui donneront lieu à des mesures de sécurité. L'acceptabilité peut difficilement être évaluée en simulant les opérateurs proches de robots. En revanche, on peut les mettre en situation au contact de maquettes cartons, voire en les immergeant à l'aide de moyens de réalité virtuelle par exemple (ce qui permet d'introduire le comportement du robot), ou bien à l'aide de robots réels (plus lourd en termes de moyens et de sécurité).

La simulation permet par ailleurs l'analyse d'autres points importants pour un projet industriel, comme les flux (entrées et sorties), l'intégration du système dans l'atelier actuel, etc. Ils ne sont pas abordés ici car plus génériques.

3.4.3.2 Comanipulation

Lors de comanipulation, l'opérateur et le robot interagissent directement, sont en contact physique. Il y a plusieurs formes de comanipulation : l'opérateur se saisit soit de la pièce portée par le robot, soit de l'effecteur (outil du robot), soit directement de plusieurs segments du robot.

En plus des aspects relatifs à la colocalisation, il est pertinent ici de simuler le contact physique entre l'opérateur et le robot, par exemple afin d'évaluer les efforts et postures (Maurice, Schlehuber, Padois, Bidaud, & Measson, 2014). Pour ce faire, des maquettes passives sont souvent utilisées pour valider la

structure et l'encombrement de ces dispositifs. On peut également directement utiliser des cobots⁸¹ avec lesquels le contact homme-robot peut se faire en sécurité.

3.4.3.3 Téléopération

Lors de téléopération, l'opérateur interagit à distance avec le robot.

En ce qui concerne la téléopération, les aspects sécurité et contact physique ne sont à prendre en compte que pour les modes transitoires et dégradés. En revanche, l'opérateur étant à distance, il doit disposer des informations nécessaires pour avoir un niveau de représentation de la situation suffisant (par exemple, quelle information visuelle afficher à l'opérateur ?) et avoir les moyens d'agir correspondant aux besoins. Le niveau d'autonomie peut ainsi être ajusté en fonction de la situation pour une performance optimale, en passant par exemple d'un des modes suivants à l'autre (Kaber, Onal, & Endsley, 2000; Endsley & Kaber, 1999) : l'autonomie complète, la supervision ou *supervisory control* (Sheridan, 1992), l'aide à la décision, l'aide à la représentation de la situation ou l'opération manuelle.

Pour simuler cette interaction distante, il est possible de maquetter/prototyper les moyens proposés à l'opérateur (écrans, voyants, alarmes, joystick, dispositif haptique, etc.).

3.4.4 Analyse des risques d'un projet cobotique

3.4.4.1 L'analyse des risques (ADR)

Un risque est un événement indésirable (coût) et incertain (probabilité) qui n'est pas intégré explicitement dans le plan (Hoc, 2004).

Les risques peuvent être liés au fonctionnement futur de la solution (inadaptation au besoin, performance insuffisante, sécurité des opérateurs négligée en conception, situations menant à des erreurs humaines, solution rejetée par les opérateurs, etc.) ou plus largement à l'entreprise (un budget dépassé, planning décalé, ressources humaines plus mobilisées que prévu, etc.).

L'analyse des risques permet l'anticipation de ces éventuels problèmes qui pourraient survenir lors d'un projet. La gestion des risques qui en découle met en place des actions pour en améliorer la maîtrise. Un des moyens de réduire de nombreux risques est d'intégrer les parties prenantes ayant les compétences pertinentes dans le projet, dont bien entendu les opérateurs. Les systèmes à risques doivent être co-conçus par les futurs utilisateurs et les concepteurs de façon incrémentale afin de mieux anticiper les situations d'utilisation, et notamment les situations à risque (Boy, 2011).

En général, les risques liés au système sont traités par une AMDEC⁸², qui est l'analyse des problèmes éventuels de la solution. Elle consiste à réaliser (Garrigou, Thibault, Jackson, & Mascia, 2001) :

- le recensement des modes de défaillance et des facteurs à leur origine ;
- l'étude des effets à partir des scénarios d'activité future, traduisant les modes de régulation par les opérateurs et/ou le système technique ;
- l'étude des modes de détection pour concevoir des environnements permettant aux opérateurs d'anticiper les effets et d'empêcher les défaillances.

La norme robotique ISO 10218-2 (2011) indique que les moyens de réduire les risques pour les opérateurs reposent sur les principes suivants :

- éliminer les phénomènes dangereux par conception ou les réduire par substitution ;

⁸¹ Pour rappel, un cobot est un robot spécialement conçu et fabriqué pour interagir physiquement avec l'homme.

⁸² Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité.

- empêcher les opérateurs d'être confrontés à des phénomènes dangereux ou s'assurer de leur maîtrise avant que l'opérateur puisse y être confronté ;
- réduire le risque lors des interventions (maintenance, apprentissage, nettoyage, etc.).

Il existe de nombreuses méthodes pour gérer les risques, liés au robot (Faber, Sinem, Mertens, & Schlick, 2016; Ogorodnikova, 2008) ou non (CETIM, 2013; Perilhon, 2003).

Safran Group a retenu une grille pour analyser les risques d'un projet industriel (cf. Tableau 22). Cet outil propose de lister les « événements redoutés » (les risques) suivant s'ils sont relatifs au contrat/finances, à la conduite du projet, à la réalisation ou à l'exploitation. Puis, il faut évaluer le risque suivant son impact sur : la solution technique, la certification, les délais, le projet en général, ou les finances.

La cotation retenue pour le risque doit ensuite être renseignée, l'impact et l'éventualité retenus (entre 1 et 4). Il faut ensuite détailler la façon dont le risque va être géré : l'action associée au risque, l'acteur, l'échéance, et l'avancement. Suivant la façon dont le risque est géré, on peut indiquer un niveau de maîtrise du risque (entre 1 et 4).

<i>Risque</i>	<i>Technique</i>	<i>Certification</i>	<i>Délais</i>	<i>Général</i>	<i>Finances</i>	<i>Impact</i>	<i>Eventualité</i>	<i>Maîtrise</i>	<i>Action</i>	<i>Acteur</i>	<i>Echéance</i>	<i>Avancement</i>
Détail du risque 1	0	2	1	1	0	2	3	1	Moyen envisagé pour traiter le risque	Chef de projet	Déc. 17	0 %
...												

Tableau 22 : Grille d'analyse des risques projet de Safran Group

Nous avons adopté cette méthode pour les projets en cobotique. Pour traiter les risques liés à l'interaction homme-robot, cela a déjà fait l'objet d'une partie de ce chapitre, notre approche consiste à intégrer les parties prenantes du projet en analysant l'activité des opérateurs et en réalisant des simulations. Nous avons, au cours de la thèse, fait le constat d'un besoin de piloter les risques liés à une mauvaise intégration de l'homme dans le projet.

3.4.4.2 Gestion des risques liés à une mauvaise intégration de l'homme

Pour limiter les risques liés à une mauvaise intégration de l'homme dans le projet, nous avons précédemment abordé le recours à l'analyse de l'activité, à des phases de simulation, et à des livrables spécifiques dans la conduite de projet. Pour veiller au bon déroulement de la démarche, nous avons cherché à introduire un indicateur de maturité du projet du point de vue de l'intégration de l'homme. Pour cela, nous nous sommes basés sur les indicateurs de maturité existants.

La plupart des projets industriels sont pilotés par un indicateur de maturité initialement développé par la NASA avec sept niveaux (Sadin, Povinelli, & Rosen, 1989), puis neuf (Mankins, 1995) : le TRL pour Technology Readiness Levels. Bien qu'il soit très adapté pour le suivi de la maturité intrinsèque d'une nouvelle technologie/brique technologique, cet indicateur l'est beaucoup moins pour les systèmes complexes.

Le TRL est donc ici clairement limité, puisque l'objectif est d'évaluer la maturité d'un ensemble technologique, appelé ici système robot, qui collabore avec l'homme. La maturité du système robot peut être évaluée à l'aide de l'IRL (Integration Readiness Levels) et SRL (System Readiness Levels), intégration des briques technologiques deux à deux (Sauser, Ramirez-Marquez, Verma, & Gove, 2006), mais là encore, l'homme est absent de l'indicateur. Le MRL (Manufacturing Readiness Levels)

correspond à la maturité d'une ligne de production, mais cet indicateur est lié à la maturité de la fabrication d'un produit donné (OSD Manufacturing Technology Program, 2011), alors que notre approche est liée à une activité.

Même en utilisant un de ces outils, la prise en compte de l'homme dans le projet est laissée de côté, et il n'existe, à notre connaissance, pas d'échelle de maturité pour l'intégration de l'homme dans la conception. Il existe cependant plusieurs indicateurs permettant de piloter la prise en compte de l'homme dans d'autres domaines :

- Le HSIP (Human System Integration Plan) pour les systèmes de défense américains (US Department of Defense, U.S. Air Force Human System Integration Handbook, 2010), dont le principe est l'intégration de préconisations centrées sur l'homme pendant différentes phases du projet, alors que nous souhaitons intégrer réellement l'homme dans le projet, pas simplement différentes recommandations.
- Le HRL (Human Readiness Levels), issu de l'industrie de l'armement (Phillips, 2010), basés sur la « performance humaine avec le système technique ». Safran Aircraft Engines, filiale de Safran Group, a démarré une réflexion se basant sur cette dernière échelle, pour l'adapter aux projets industriels. Nous avons estimé cette démarche très intéressante et avons donc repris les travaux débutés par une stagiaire ingénieure cognitive dans cette filiale. Nous recommandons tout de même d'être prudents avec l'appellation *Human Readiness Level*, qui laisse entendre qu'il faut préparer l'homme à la technologie, plutôt que de l'intégrer au projet.
- Le HFRL (Human Factors Readiness Levels), inspiré du contrôle aérien, est intéressant puisqu'il donne des critères précis pour le passage au niveau suivant, et spécifie que des utilisateurs représentatifs doivent être impliqués. Elle s'arrête cependant au niveau du prototype (Hale, Fuchs, Carpenter, & Stanney, 2011).

Nous avons donc entrepris la mise au point d'une échelle adaptée à la gestion de projet Safran Group et compatible de l'approche cobotique développée dans cette thèse. Pour cela, nous nous sommes largement inspirés de la démarche de la NASA qui, dans son rapport sur l'ingénierie des systèmes (NASA, 2007), associe les niveaux appelés « Human Factors Engineering Process Integrating Points » aux différentes phases des projets (cf. Figure 48), exactement ce que nous souhaitons faire avec la conduite de projet PROMPT.

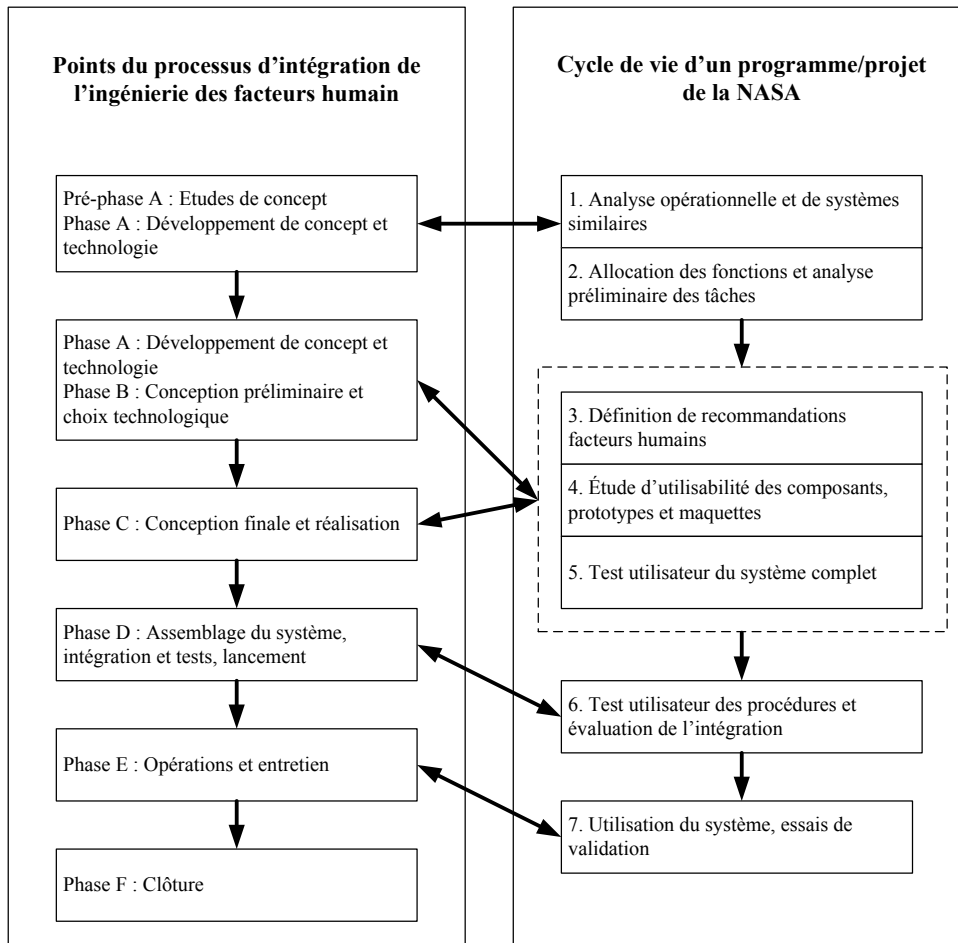


Figure 48 : L'ingénierie facteur humain et ses liens avec la conduite de projet de la NASA (2007)

Nous avons donc phasé les niveaux d'intégration de l'homme, inspirés de l'approche cobotique, de la démarche ergonomie de l'entreprise, et des différents indicateurs précités, avec les 11 jalons PROMPT, pour arriver au résultat du Tableau 23. Nous avons baptisé ce nouvel indicateur le HIRL, l'« Human Integration Readiness Levels ».

HIRL	Étape du projet	Prérequis au HIRL	Jalon
1	<i>Analyse de la demande</i>	Récolte de la demande initiale. Visite voire observation sommaire de situation(s) de référence. Rencontre et brefs entretiens avec les acteurs du projet (opérateurs, chef d'atelier, méthode, etc.). Formalisation et validation la demande avec le groupe de travail (décideurs, concepteurs, opérateurs, chef d'atelier, méthodiste, etc.), en particulier en ce qui concerne l'ergonomie et les facteurs humains : objectifs performance des opérateurs et santé.	J1
2	<i>Analyse et formalisation du besoin</i>	Analyse de l'activité d'opérateurs au poste actuel (s'il existe) ou d'autres activités de référence. Analyse sommaire des postes amont/aval. Analyse du contexte du poste (historique, rôle dans l'entreprise, etc.). Intégration d'exigences normatives en ergonomie et issues de l'analyse de l'activité dans le cahier des charges fonctionnel.	J1''
3	<i>Principe et premières simulations (esquisses)</i>	Mise au point de principes de solutions avec le groupe de travail sur la base de simulations simples (<i>story telling</i> , croquis, simulation numérique simple).	J2
4	<i>Étude sommaire et simulations scénarisées (maquette)</i>	Évaluation par les acteurs du projet (dont les opérateurs) d'une maquette (modélisation non fonctionnelle du système envisagé) simulant les interactions homme-système pour les phases pour lesquelles l'homme est dans la boucle (supervision, pilotage, etc.).	J2''
5	<i>Etude de détail et simulations avec scénarios représentatifs (démonstrateur)</i>	Évaluation par les acteurs du projet (dont les opérateurs) d'un démonstrateur (partiellement fonctionnel) avec des scénarios incluant un maximum de situations dont les cas transitoires et dégradés.	J3
6	<i>Prototype industriel</i>	Évaluation par les acteurs du projet (dont les opérateurs) en simulation d'un prototype (fonctionnel) avec des scénarios incluant tous les modes de fonctionnement dont les cas transitoires et dégradés.	J3'
7	<i>Implantation</i>	Vérification de la réponse aux exigences relatives à l'homme dans le cahier des charges. Démonstration du fonctionnement au groupe de travail.	J4
8	<i>Formation et réglages</i>	Formation des opérateurs à l'utilisation du système sur toutes les références, dans tous les modes de fonctionnement. Évaluation par le groupe de travail (dont les opérateurs) et réglages du système final (pour l'ensemble des opérateurs). Validation par une analyse de la nouvelle activité de travail.	J5
9	<i>Fonctionnement nominal et retour d'expérience</i>	Retour d'expérience sur le système suite aux évolutions apparues en production.	J6

Tableau 23 : Indicateur de maturité de l'intégration de l'homme au système proposé : le HIRL (Human Integration Readiness Level)

La prochaine étape pour valider cet indicateur est son utilisation pour piloter des projets d'introduction de robots dans les usines pour en évaluer l'intérêt.

Chapitre 4 Cas d'étude : le nettoyage des cuves

Dans cette partie est décrit le cas d'étude qui constitue l'expérimentation principale de la thèse. Il s'agit de la conception d'un système pour améliorer le poste de « nettoyage des cuves » de propergol⁸³ pâteux. L'étude couvre l'analyse de l'activité de nettoyage des cuves, la conception à travers une approche basée sur des simulations participatives, pour aller jusqu'aux spécifications techniques du système retenu pour préparer l'industrialisation.

Dans ce chapitre, les étapes du projet seront mises en relation avec l'indicateur de maturité développé au Chapitre 3 : le HIRL (Human Integration Readiness Level).

4.1 Analyses et formalisation du besoin

*Ces analyses contiennent l'analyse de la demande, correspondant au **HIRL 1**, et le transfert des résultats de l'analyse de l'activité vers une formalisation fonctionnelle **HIRL 2**.*

4.1.1 Analyse de la demande

4.1.1.1 Contexte du nettoyage des cuves

Le type d'activité d'Ariane Group présente des caractéristiques particulières qui méritent d'être présentées ici. Les produits sont développés pour être fabriqués sur de longues périodes (plus de vingt ans pour Ariane 5). De plus, les pièces sont généralement extrêmement coûteuses et leur qualité est critique. Chez cet industriel, les cadences rendent les métiers « artisanaux » et la criticité leur demande une grande précision. Bien que cela semble contradictoire, une des spécificités d'Ariane Group est d'allier cette forme d'*artisanat industriel* à la précision. Dans ce contexte, très peu de robots ont pu être implantés à ce jour, mais le profil de cette société semble pouvoir correspondre à la cobotique, en faisant collaborer l'opérateur/artisan et son métier avec des robots. La dernière particularité que nous citerons ici concerne notamment l'activité de propulsion solide, pour laquelle sont fabriqués des produits pyrotechniques ayant notamment vocation à propulser la fusée Ariane. La *culture pyrotechnique*⁸⁴ d'Ariane Group est très présente, d'autant plus qu'un accident dramatique a eu lieu en 2013. C'est dans ce secteur que nous avons évolué pendant trois ans, principalement afin d'améliorer les conditions de travail des opérateurs et de limiter leur exposition à des risques pyrotechniques.

⁸³ Matériau pyrotechnique utilisé pour la propulsion.

⁸⁴ C'est ainsi qu'est désignée la prise en compte de la sécurité pyrotechnique à Ariane Group.

Le cas d'étude naît d'un besoin d'amélioration du poste de nettoyage des cuves de propergol de capacité 1800 Gallons en Guyane au sein de la société Regulus⁸⁵. Pour des raisons d'accessibilité du poste et de besoin similaire présumé, c'est en premier lieu le poste de nettoyage des cuves de propergol de capacité 420 Gallons à Saint-Médard-en-Jalles qui a été ciblé. Bien que les équipes de production en métropole soient intéressées par le projet et conscientes du besoin, la volonté d'avancer sur ce sujet reste moins forte qu'en Guyane.

L'établissement de Saint-Médard-en-Jalles est un site historiquement lié à la pyrotechnie, puisque poudrerie royale dès le XVII^e siècle. De ce fait, des règles spécifiques très strictes sont appliquées sur le site de façon globale (sécurité routière et extincteurs, interdiction de matériel de fumeur par exemple), mais aussi aux abords et dans les bâtiments au sein desquels se trouvent et sont manipulés des matériaux pyrotechniques.

Par ailleurs, le démarrage du projet a été accéléré par la mise au point d'une nouvelle technologie de nettoyage du propergol : l'hydrogommage (mélange de particules solides, d'eau et d'air sous pression). Une des données d'entrée de l'étude a donc été de profiter du développement de cette technologie pour simplifier le procédé de nettoyage, actuellement fait manuellement par raclage, grattage puis essuyage.

Dans ce contexte, David Bitonneau, ingénieur en informatique spécialisé en robotique, et moi-même, ingénieur en cognitique, avons entamé les analyses du besoin en binôme. Le besoin exprimé au départ était d'améliorer les conditions de travail au poste et la sécurité des opérateurs en utilisant l'hydrogommage, en évaluant spécifiquement l'apport éventuel de la cobotique pour ce poste. Pour mener ce projet, nous étions positionnés au sein de la direction Ingénierie, principalement en charge de la conception des moyens de fabrication du propergol.

Nous avons réuni un groupe de travail, le groupe « nettoyage des cuves », qui comprend le chef d'atelier, le méthodiste, l'ergonome Safran⁸⁶, un ingénieur procédés et nous-même, ingénieurs/doctorants en robotique et en cognitique. Nous avons la volonté de construire une démarche interdisciplinaire s'appuyant sur nos domaines respectifs. David Bitonneau et moi avons donc endossé le rôle de chef de projet en binôme. Il a contribué à la partie « cognitique » pour laquelle j'ai apporté un socle théorique ; et j'ai contribué à la partie robotique, qui était sa spécialité.

Le binôme roboticien/cogniticien est une des clés de la thèse, puisque l'hypothèse à l'origine de celui-ci est que la cobotique, si elle ne peut être traitée en occultant les aspects robotiques, ne peut évidemment pas être traitée en occultant les aspects humains. Ce binôme, en tant que chef de projet, a réuni le groupe « nettoyage des cuves » une heure environ toutes les deux semaines. De plus, les compétences d'ingénieur issues de notre parcours ont été un facteur déterminant. En effet, un projet d'ingénierie pour un moyen industriel nécessite d'être capable de gérer un projet, de prendre en compte les contraintes industrielles, de participer et d'échanger avec différents corps de métier.

Au départ, la réunion du groupe « nettoyage des cuves » et la rencontre des opérateurs ont permis de récolter les attentes et visions des acteurs du projet sur la robotique, comme « remplacement du travail des opérateurs », et de l'ergonomie, comme « s'intéressant à la santé, au port de charges ». Nous avons par conséquent expliqué en quoi consistent la cobotique et la démarche que nous expérimentons, ce qui a été très bien accueilli par les parties prenantes. La communication très en amont du projet a ainsi grandement contribué à enrichir les échanges que nous avons eus tout au long du projet.

⁸⁵ Filiale à 40 % de Ariane Group en charge de la production des chargements propulsifs pour le spatial, à Kourou, Guyane.

⁸⁶ Il s'agit du responsable de l'ergonomie pour le groupe Safran, qui est à l'origine et qui pilote le projet cobotique pour le groupe. Étant peu disponible, il a réalisé un suivi de l'étude. L'ingénieur cogniticien a pleinement joué le rôle d'« ergonome de la cognition », comme proposé par Hoc (1998).

4.1.1.2 Compréhension générale du poste

L'objectif ici est de comprendre l'histoire du poste et de l'entreprise, les acteurs concernés au-delà du demandeur, les tentatives de réponse déjà apportées, les évolutions organisationnelles, et les processus techniques. En effet, comme le dit Béguin (2007), « l'activité n'est pas isolée, elle est située dans un contexte (matériel, social, historique) qui fournit des ressources et des contraintes qui ont un coût pour la personne ». Cela permet par ailleurs d'être préparé aux futurs échanges avec les opérateurs qui pourront utiliser leur langage professionnel habituel (Daniellou & Béguin, 2004).

Pour comprendre le poste de travail, nous avons tout d'abord visité les locaux abritant l'opération avec le chef d'atelier. Cette visite a permis de recueillir de façon informelle de nombreux éléments concernant l'histoire du poste de travail, ou ses difficultés par exemple. Nous avons également analysé les gammes et instructions de travail.

Nous avons également analysé les étapes amont et aval. En amont, les cuves sont utilisées pour mélanger les composants du propergol. Le produit est ensuite coulé dans son réceptacle final à l'aide d'un piston. C'est suite à cette étape qu'il faut nettoyer les cuves dans lesquelles il reste de la pâte (entre 50 kg et 200 kg), collante, visqueuse et pyrotechnique⁸⁷. En aval, après nettoyage, les cuves sont stockées avant d'être réutilisées pour d'autres mélanges. En stockage, elles ne doivent plus contenir la moindre trace de matière pyrotechnique pour des raisons évidentes de sécurité et pour ne pas polluer le futur mélange.

La production de propergol s'organise en « campagnes », c'est-à-dire en semaines intensives lors desquelles un chargement entier est fabriqué. Au cours de ces campagnes, pour éviter que le propergol ne se solidifie dans la cuve, il faut les nettoyer sans attendre, dès leur arrivée au bâtiment de nettoyage, c'est-à-dire environ toutes les 3 heures. Pour le nettoyage des cuves, une campagne représente le nettoyage d'une dizaine de cuves d'affilée, en 3 x 8, avec des équipes de 2 opérateurs. Ceux-là ne sont donc pas affectés uniquement au nettoyage des cuves, ils ont également en charge la préparation des matières premières. Les postes amont de coulée et aval de stockage et réutilisation ont été également analysés.

⁸⁷ Pyrotechnique ne signifie pas qu'il s'agit d'explosif, mais qu'il s'agit d'un matériau qui dégage une grande quantité d'énergie lorsqu'il est en combustion.

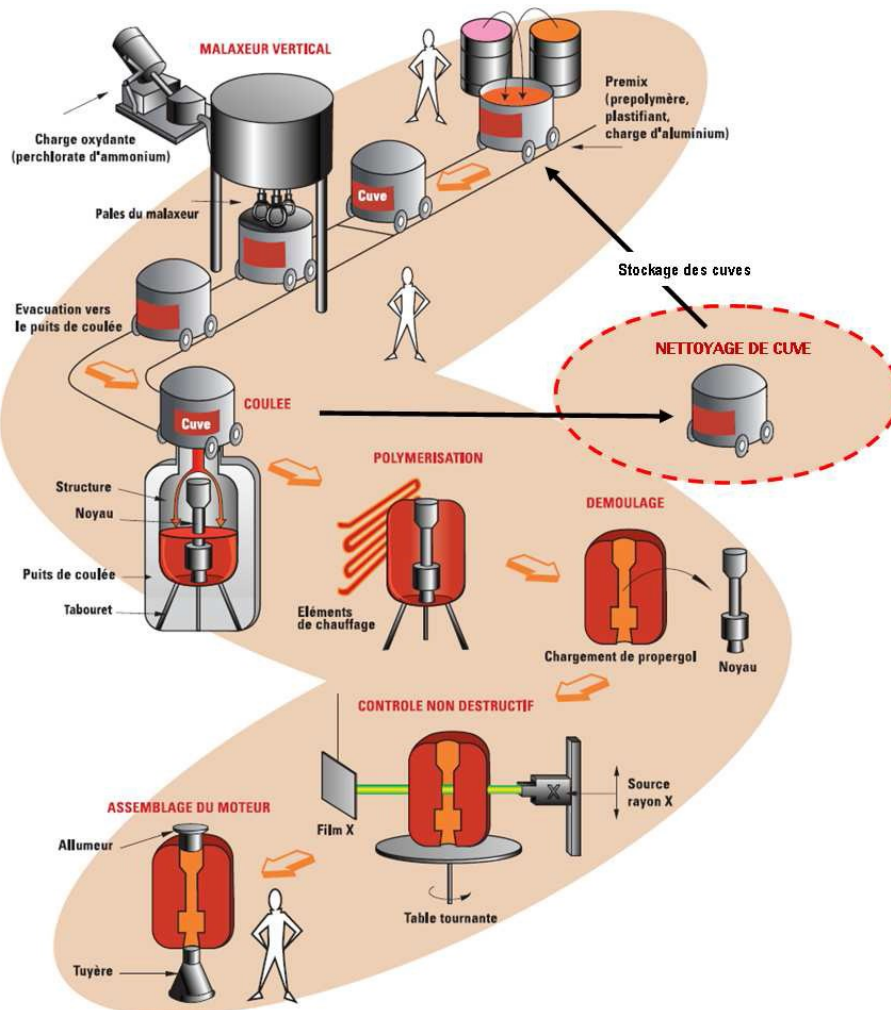


Figure 49 : Cycle de fabrication de chargements propulsifs à Ariane Group

Autrefois, le nettoyage de cuve était réalisé à l'aide de solvants, dont l'utilisation a été fortement restreinte dans les années 90 pour des raisons de santé et environnementales. La meilleure solution proposée reste donc la solution actuelle. Ses principales étapes sont :

1. arrivée de la cuve ;
2. retrait de la vanne (nettoyée en parallèle) ;
3. raclage des parois de la cuve (a priori éprouvant physiquement) ;
4. grattage des parois de la cuve, en utilisant un produit liquide plastifiant pour fluidifier la pâte de propergol ;
5. finition de la cuve au chiffon et plastifiant ;
6. remontage de la vanne et tests d'étanchéité ;
7. départ de la cuve.

Constatant la pénibilité du poste, en particulier en Guyane⁸⁸ où les cuves sont plus grandes et les conditions climatiques plus hostiles (température et hygrométrie élevées), la conception d'une machine de nettoyage a déjà été entreprise. Nous ne rentrerons pas dans le détail ici, mais l'analyse du fonctionnement de cette machine et les raisons de son inefficacité et de son rejet par les opérateurs ont nourri la réflexion de la société et la nôtre. En particulier, la non-acceptation de la solution par les

⁸⁸ Nous avons eu l'occasion d'observer le poste à Kourou, en Guyane, lors d'une mission du 11 au 18 septembre 2016.

opérateurs et la durée des étapes annexes (nettoyage de la machine, mise en place et retrait de la machine) ont fait l'objet d'un partage d'expérience au sein du groupe « nettoyage des cuves ».

Pour constater les apports éventuels de l'hydrogommage⁸⁹ pour le nettoyage, les premiers résultats des essais étaient insuffisants. Nous avons conclu qu'il fallait réaliser des essais complémentaires pour évaluer l'efficacité de cette technologie en condition réelle.

Enfin, une analogie qui nous sera donnée par un opérateur permet de comprendre la connotation du poste dans l'entreprise : « Si tu veux, la fabrication du propergol, c'est un peu comme de la pâtisserie. Nous, on prépare les matières, et nettoyer les cuves, c'est faire la vaisselle. ». Pour favoriser l'acceptation de la solution, la transformation du poste doit donc également revaloriser ce poste qui est peu considéré.

4.1.1.3 Analyse de situations de référence

En plus de l'analyse de l'activité actuelle de nettoyage des cuves, qui est détaillée dans la partie suivante, nous avons observé d'autres situations de référence de systèmes ayant des caractéristiques similaires. Cela fournit des informations sur un grand nombre de problèmes liés au contexte, dont certains aspects persisteront, même si le système est très novateur.

Tout d'abord, nous avons visité une installation robotique manipulant du produit pyrotechnique en fonctionnement sur le site : la manutention de blocs pour une opération de contrôle. Connaître et analyser ce poste nous a permis de convaincre le groupe « nettoyage des cuves » de la possibilité d'utiliser un robot en milieu pyrotechnique. Nous avons également observé des postes de supervision à Saint-Médard, l'utilisation d'un robot sur du produit pyrotechnique ne pouvant a priori se faire que depuis un poste de commande.

Il existe d'autres postes de nettoyage des cuves qui utilisent d'autres techniques. Dans l'établissement de Saint-Médard-en-Jalles, il y a un poste de bullage (solution qui ne peut être retenue pour notre problématique pour des raisons de gestion des déchets et de temps de cycle), et une solution de nettoyage de cuves de propergol chez une autre société faite par les opérateurs après basculement de la cuve à 90°. Ces solutions ont été écartées par le groupe « nettoyage des cuves » pour des raisons techniques.

Plus largement, nous avons recherché des systèmes de nettoyage, notamment robotiques, et trouvé diverses solutions qui nous ont inspirés pour la conception : nettoyage de pièces entraînées en rotation dans une cabine, robot mobile pour nettoyer des cuves de pétrole, nettoyage de conduits à l'aide de buses spécifiques, etc. Cette partie de l'état de l'art et le détail de son utilisation sont décrits dans la thèse de David Bitonneau⁹⁰.

4.1.2 Analyse de l'activité de nettoyage des cuves

L'analyse de l'activité⁹¹ a été faite en rencontrant les opérateurs à deux reprises, puis en observant grâce à des caméras⁹², puis en formalisant et débriefant l'analyse à l'aide de la méthode MASK (cf. 3.3.3). Plus tard dans le projet, quand cela a été possible, nous avons observé directement le poste pour alimenter plus encore l'analyse.

⁸⁹ Nouvelle technologie de nettoyage du propergol par projection d'air, d'eau et de billes non abrasives.

⁹⁰ Pour rappel, la thèse de David Bitonneau porte sur les aspects techniques et en particulier robotiques de la conception de systèmes cobotiques.

⁹¹ Plus de détails sur le principe de l'analyse de l'activité sont disponibles dans la section 3.3.2.

⁹² L'observation directe proche du produit pyrotechnique nous était interdite à ce moment-là. Elle est réservée aux personnels titulaires formés aux risques.

Les entretiens exploratoires ont été réalisés à l'aide d'une grille de questions en deux parties. La première traitait les questions relatives au déroulé de l'activité de façon chronologique, sur la base de l'étude du contexte. La seconde partie était plus transverse et informelle. Elle avait vocation à récolter le maximum de connaissances sur le contexte, les imprévus, les situations exceptionnelles, les difficultés, la perception du poste de travail par les opérateurs et même leurs idées, non seulement sur l'amélioration de leur poste à court terme, mais aussi sur le futur système.

Exemples de questions générales :

- Quelle est son expérience dans le nettoyage de cuve ?
- Quelles sont les conséquences des différences entre les mélanges à nettoyer ?
- Quelles sont les incidences de la durée d'attente depuis la coulée ?
- Qu'est-ce qui change pour vous lorsque les cuves sont en mauvais état ?

Mise en situation : les étapes du nettoyage :

- *Étapes, outils, comment sont-ils utilisés ? Préparés ?*
- Arrivée de la cuve sur chariot qui la dépose sur des rails.
- La cuve dispose de moteurs pneumatiques et avance jusqu'au poste de nettoyage (elle repart de la même manière). Un sas permet de garantir la sécurité des opérateurs.
- Libération de la vanne en raclant le produit au-dessus de celle-ci.
- Dégagement/démontage de la vanne et extraction à distance.
- Raclage de la cuve.
- Pulvérisation de plastifiant et nettoyage à la paille de fer.
- Raclage du col de cygne (à l'aide d'une curette).
- Nettoyage de finition : l'opérateur repère les impuretés et les nettoie avec un chiffon imbibé de plastifiant.

Tableau 24 : Extrait de la grille d'entretien exploratoire du projet nettoyage des cuves

Nous avons alors construit les différents diagrammes à l'aide de ces données. La seconde série d'entretiens avait pour but d'aller dans le détail de l'activité, d'éclaircir les zones d'ombre sur l'activité. Nous avons donc élaboré une grille reprenant notre compréhension du poste, en mettant l'accent sur les zones d'ombre de la modélisation des connaissances, les phases les moins détaillées et semblant les plus complexes.

- 1. Préparation avant arrivée de la cuve.**
 - a. Quel équipement en arrivant ?
 - b. Quoi en plus comme équipement ?
 - c. Quelle préparation des poubelles ?
 - d. Autres variabilités ?
- 2. Arrivée de la cuve.**
 - a. Déposée sur des rails par un chariot ? qui pilote ?
 - b. Moteurs pneumatiques : comment sont-ils actionnés ?
 - c. Quand ouvre-t-on le « sas » ? Les portes en général ?
 - d. Comment se fait l'enlèvement du couvercle ?
 - e. Quelles précautions suivant le type de produit ?
 - f. Autres variabilités ?
- 3. Dégagement de la vanne.**
 - a. Avec une raclette ? (différentes raclettes suivant le type de propergol)
 - b. Quelle surface doit être dégagée ?
 - c. Autres variabilités ?
- 4. Extraction de la vanne.**
 - a. Est-ce bien un démontage de la vanne ?
 - b. Comment se fait-il ?
 - c. Nettoyage de la vanne dans l'atelier 10 ?
 - d. Quelles précautions sont prises ?
 - e. Autres variabilités ?
- 5. Raclage.**
 - a. Par quoi commencer ?
 - b. Les parois sont-elles également raclées ?
 - c. Au cours du geste, de plus en plus difficile ?
 - d. Quand faut-il plusieurs passages ?
 - e. Propergol trop polymérisé : quantifier l'effort supplémentaire (ordre d'idée)
 - f. Soulève le propergol et le verse dans le trou central ?
 - g. Comment savoir que le raclage est terminé ?
 - h. Faire attention à ne pas abîmer la cuve ?
 - i. Angle d'attaque particulier ? Quelles forces dans quelles directions ?
 - j. Comment ça se passe au niveau des bordures ?
 - k. Autres variabilités ?
- 6. Etc.**

Tableau 25 : Extrait de la grille d'entretien d'explicitation du projet nettoyage des cuves

À ce moment-là, nous n'avions pas l'habilitation suffisante pour nous trouver en zone pyrotechnique. L'observation directe était donc impossible. Nous avons donc mis en place un dispositif d'observation avec des caméras, placées avec l'aide des opérateurs, des services techniques, et du chef d'atelier. Figure 50, les plans du dispositif d'observation sont présentés, ainsi qu'une capture d'écran des vues offertes par les caméras lors du nettoyage.

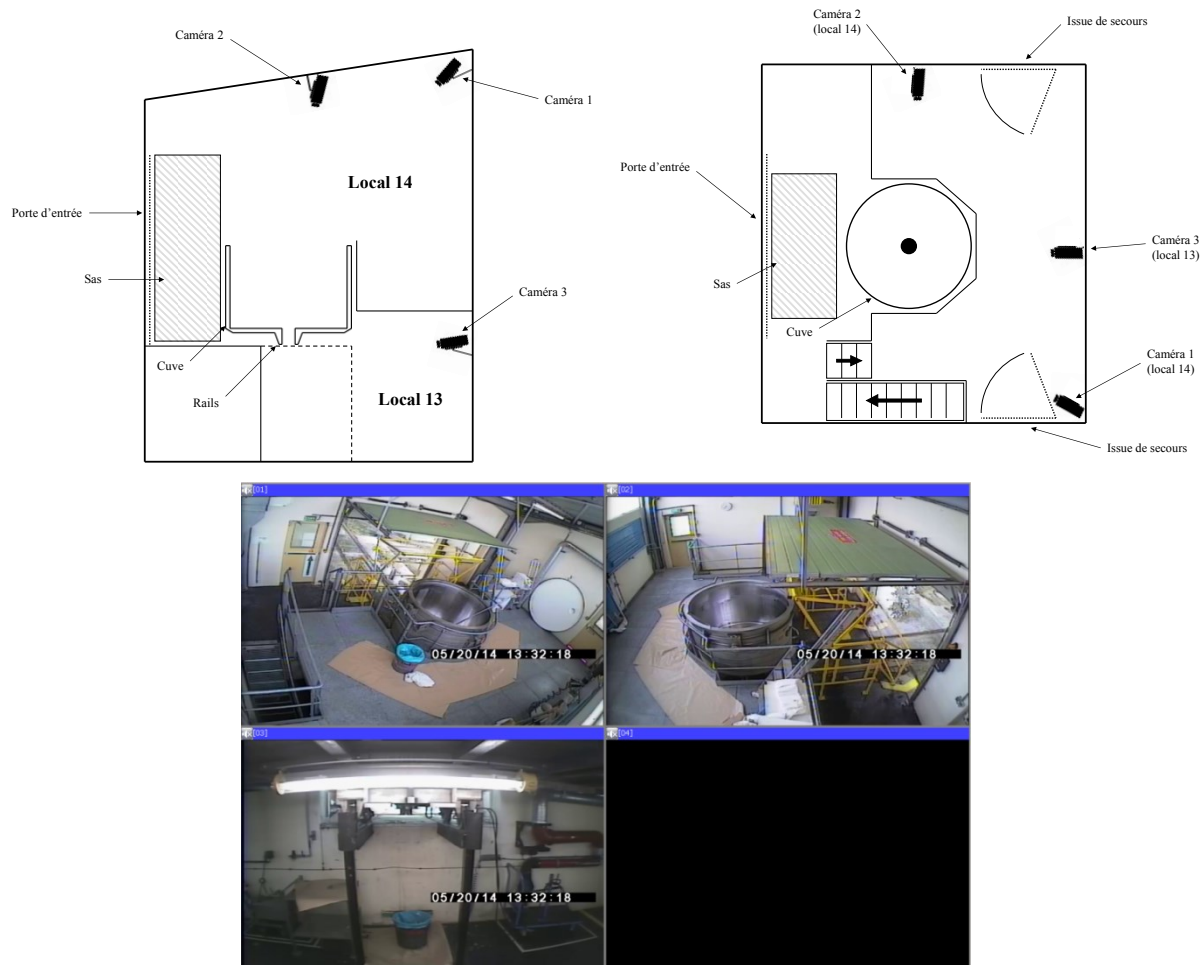


Figure 50 : Dispositif d'observation du nettoyage des cuves à l'aide de caméras

L'analyse des vidéos a permis de compléter la formalisation et de faire émerger de nouvelles questions. Pour comprendre les vidéos et le déroulement de l'activité, nous avons organisé une autoconfrontation. Cela a consisté à débriefer avec les opérateurs en repassant avec eux individuellement quelques séquences. Nous en avons profité pour compléter les diagrammes détaillant l'activité. Ainsi, encore une fois, nous avons pu enrichir et fiabiliser notre compréhension du poste.

4.1.3 Résultats de l'analyse de l'activité

Le premier résultat de l'analyse de l'activité est résumé dans les trois diagrammes (exemples Figure 51, Figure 52 et Figure 53). Cette description détaillée du travail réel permettra de le transformer. L'utilisation d'un logiciel de carte heuristique⁹³ a permis à la fois la prise de note rapide, flexible et organisée, d'insérer des contenus multimédias, des pictogrammes et des liens.

⁹³ Nous avons utilisé le logiciel XMind (<http://www.xmind.net/>) comme logiciel de carte heuristique, aussi appelés « logiciels de *mindmapping* ».

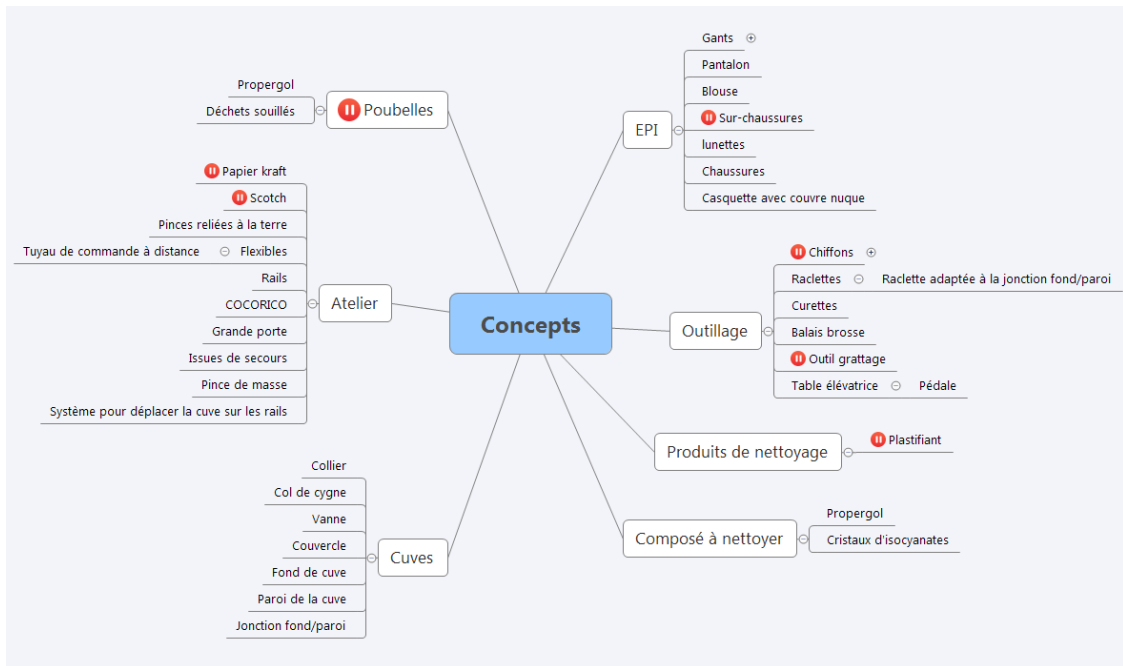


Figure 51 : Vue d'ensemble du diagramme des concepts du nettoyage des cuves

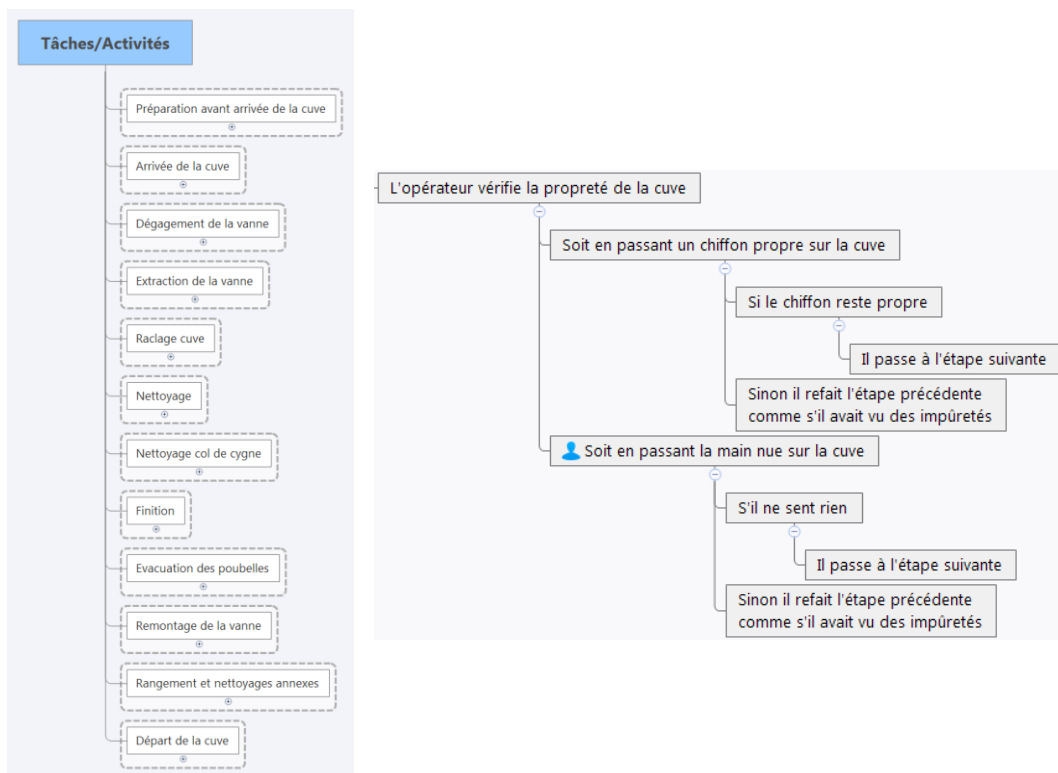


Figure 52 : Vue d'ensemble et extrait (concernant le contrôle de la propreté) du diagramme tâches/activités du nettoyage des cuves

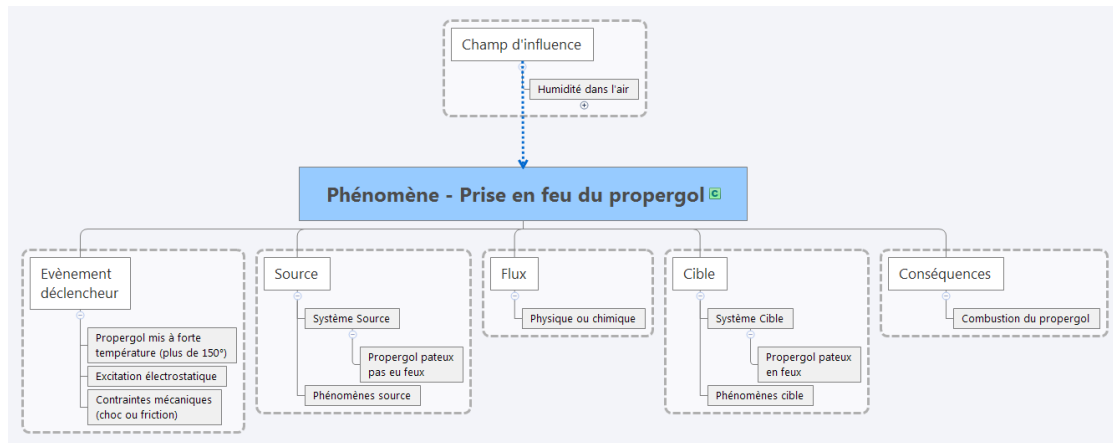


Figure 53 : Exemple d'un diagramme de phénomène du nettoyage des cuves, la prise en feu du propergol

Souhaitant rassembler les paramètres influents des phases-clés du nettoyage, à savoir le raclage, le grattage, la finition et le contrôle visuel, pour aider à la conception, nous avons également utilisé un formalisme des hypothèses en ergonomie (cf. 2.1.1, Figure 7), dont les déterminants peuvent être classés suivant la typologie des 5M dans un diagramme d'Ishikawa (cf. Figure 54). Pour illustrer l'utilisation des hypothèses, nous prendrons ici l'exemple de l'étape de finition, décrite par la Figure 55.

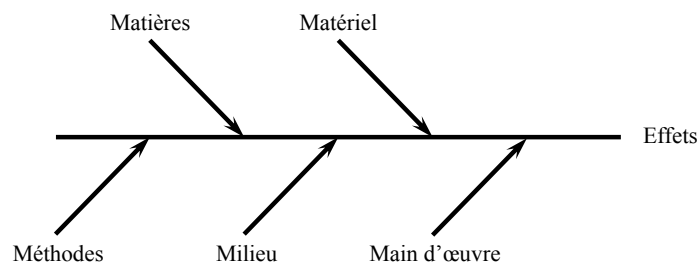


Figure 54 : Arbre des causes sous la forme du diagramme d'Ishikawa (1968)

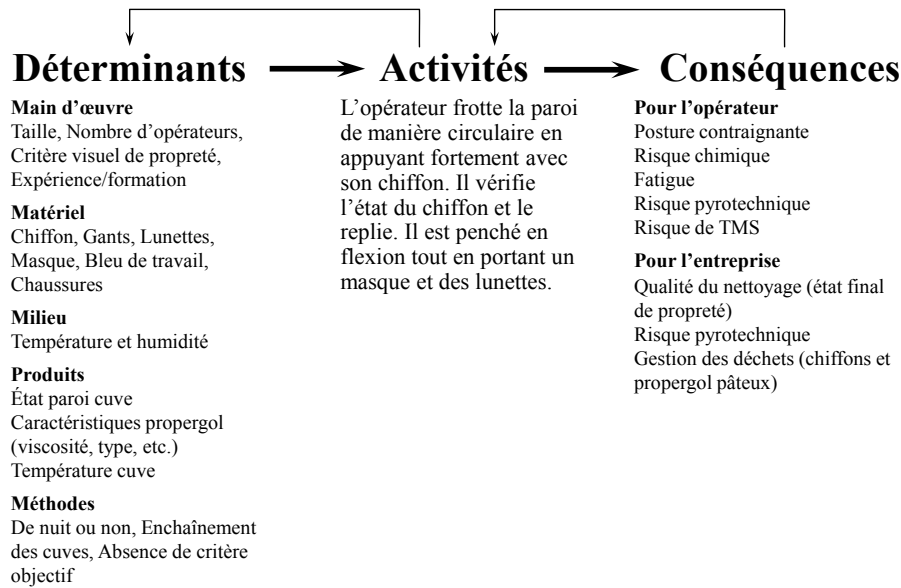


Figure 55 : Schéma d'une hypothèse ergonomique du nettoyage des cuves relative à la finition

Ainsi, la transformation de l'activité de travail se fera ensuite par l'ajout de déterminants, relatifs au robot par exemple. Elle se fera également par la suppression de déterminants, notamment ceux qui sont liés au travail d'un opérateur sans robot. L'ajout et la suppression de déterminants modifiera également les conséquences de l'activité pour l'opérateur qui disposera de moyens différents, et pour l'entreprise du point de vue de la performance et de la sécurité du nouveau système. Cependant, de nombreux déterminants seront conservés, et les variabilités associées seront à réguler par le système futur, c'est pourquoi il est crucial d'analyser dans le détail l'activité actuelle.

L'analyse de l'activité a aussi été l'occasion de repérer des pistes d'amélioration à court terme que nous avons transmises au chef d'atelier, comme par exemple la gestion des feux d'avertissement, les équipements de protection individuels (EPI), ou bien la gestion des outils pour ne pas obstruer les issues de secours.

Une première version de l'analyse des risques projet a été réalisée en suivant la méthode Safran (cf. 3.4.4). Les résultats de l'analyse ne sont pas exposés dans ce manuscrit pour des raisons de confidentialité.

Par ailleurs, les opérateurs ont pu constater que nous prenions en compte les situations réelles de travail, ce qui a favorisé leur adhésion à la démarche.

L'analyse de l'activité n'est jamais tout à fait terminée, il y a toujours des détails supplémentaires à observer. La granularité de l'analyse dépend grandement des objectifs du projet et des ressources disponibles.

Étant conscients de cette limite, nous avons, tout au long des étapes suivantes, cherché à récolter un maximum de données supplémentaires utiles à la conception auprès des différentes parties prenantes du projet.

4.1.4 Formalisation par l'analyse fonctionnelle

Les déterminants issus de l'analyse de l'activité ont été intégrés dans une analyse fonctionnelle, co-construite avec le groupe « nettoyage des cuves ». L'intérêt de l'analyse fonctionnelle est de

4.2 Principe de solution

formaliser le besoin pour le système futur, afin de la faire valider puis éventuellement de l'adresser à des fournisseurs. Nous avons pour cela suivi la méthode APTE (Tassinari, 2006), utilisée par Safran dans le cadre des projets Industrie du Futur et par Ariane Group. Nous avons par exemple pu faire apparaître les variations sur la quantité de produit, son état, les outils et la façon de les utiliser, ou l'usage de la passerelle.

Nous avons complété cette analyse fonctionnelle avec un tableau résumant l'activité actuelle de nettoyage, afin que les destinataires du document aient conscience des contraintes externes au nettoyage intrinsèque des cuves. Le Tableau 26 illustre cela avec deux lignes extraites, qui correspondent à la préparation avant arrivée de la cuve et au nettoyage des parois.

<i>Tâche</i>	<i>Sous-tâche</i>	<i>Valeur ajoutée de l'opérateur</i>	<i>État actuel conservé</i>	<i>Commentaire</i>
<i>Préparation</i>	S'équiper de vêtements adaptés au nettoyage dans les vestiaires		oui (F0)	Adaptés pour la protection des opérateurs.
	Passer au COCORICO (test de conductivité électrique)		oui (F0)	Interdiction d'entrer dans l'atelier si l'on n'est pas conducteur (risque de prise en feu avec l'électricité statique).
	Tapisser l'atelier de papier kraft	Faible	oui (F2)	Peu couteux et évite un nettoyage supplémentaire.
...				
<i>Nettoyage des parois</i>	Pulvériser du plastifiant sur les parois de la cuve	Élevée	oui (F2)	Le plastifiant employé rend le nettoyage plus facile.
	Frotter au balai brosse	Élevée	non (F0)	Pénible physiquement.
	Positionner des chiffons blancs et frotter avec le balai brosse	Élevée	non (F0)	Pénible physiquement.

Tableau 26 : Extrait du tableau d'activité inséré dans l'analyse fonctionnelle

La contrainte principale ajoutée à l'analyse fonctionnelle par rapport à l'activité actuelle est le positionnement des opérateurs hors des zones de danger pendant les opérations pyrotechniques. En effet, les acteurs du projet souhaitaient à l'unanimité profiter de l'introduction d'un nouveau système de nettoyage pour limiter le contact des opérateurs avec le produit pyrotechnique. Cette contrainte aura un impact fort sur les solutions envisagées dans la partie suivante.

4.2 Principe de solution

La mise au point d'un principe de solution et de premières simulations correspond au HIRL 3.

4.2.1 Hypothèses sur l'activité future

Pour répondre aux besoins exprimés dans l'analyse fonctionnelle et avoir une idée des solutions matures pour répondre à ce besoin, nous nous sommes tournés vers des fournisseurs potentiels. Bien

que les échanges avec eux aient été sommaires⁹⁴, leur réponse nous a permis d'avancer sur la fiabilité de différents principes de solutions. Celui semblant le plus pertinent à ce moment du projet est décrit dans cette section.

Nous avons construit des hypothèses de conception du système cobotique. Pour cela, nous avons utilisé les hypothèses en ergonomie réalisées précédemment (cf. 4.1.2). Elles ont été adaptées pour que nous puissions nous projeter vers l'activité future. L'activité future du système concerne la combinaison de celle de l'homme et de celle du système robot. Le tableau permet d'identifier les déterminants sur lesquels on souhaite intervenir, et ceux que l'on ne peut pas maîtriser.

On émet alors une (ou plusieurs) hypothèse sur une activité future. L'activité peut être transformée si l'on modifie ses déterminants, ce qui modifie également ses conséquences. Le plan d'action pour atteindre l'activité future apparaît alors clairement (le cas générique est décrit par le Tableau 27). Là encore, nous prendrons l'exemple de l'étape de finition pour illustrer l'utilisation du tableau (cf. Tableau 28).

<i>Déterminants</i>	<i>Activité future de l'opérateur</i>	<i>Activité future du robot</i>	<i>Conséquences</i>
Opérateur Robot (logiciel, matériel, capteurs, moyens d'interaction) Outils Produit Environnement physique Organisation	Boucles perception/action (vis-à-vis du robot et de la tâche), marge de manœuvre, rôle de l'opérateur.	Boucles capteurs/effecteurs et interface homme/robot, autonomie, rôle du robot.	Pour l'opérateur Pour le robot (pour la préservation de son état) Pour l'entreprise

Tableau 27 : Représentation de l'activité future du système cobotique

<i>Déterminants</i>	<i>Activité future de l'opérateur</i>	<i>Activité future du robot</i>	<i>Conséquences</i>
Opérateur Robot (logiciel, matériel, capteurs, moyens d'interaction) Outils Produit Environnement physique Organisation	Pilotage des actions de nettoyage à l'aide d'un moyen de pilotage (clavier, joystick, moyen haptique, ou autre), passage en « mode automatique » possible.	IHM : - Retransmission des caméras et données capteur de force - Moyen de pilotage du robot et GUI pour passer en mode automatique Capteur/effecteur : - Captation via caméras et capteur de force - Action de nettoyage pilotée par l'opérateur	Pour l'opérateur Pour le robot (pour la préservation de son état) Pour l'entreprise

Tableau 28 : Exemple d'utilisation du tableau d'activité future - la finition du nettoyage des cuves

⁹⁴ Cela s'explique par le fait qu'à ce stade, les échanges avec les fournisseurs n'étaient pas contractualisés.

4.2.2 Modélisation d'un principe de solution

Dans les tableaux précédents, le type de système cobotique envisagé pour le nettoyage des cuves est un système de téléopération (cf. 2.4.4). Plus précisément, l'opérateur peut avoir deux rôles dans la collaboration : celui de superviseur pendant un cycle de nettoyage, et celui de pilote lorsqu'il décide de prendre la main. Le robot, lui, subit ce changement de rôle, qui correspond pour lui aux rôles de robot supervisé et de robot exécutant (cf. 2.3.2). Les changements de rôle étant à l'initiative de l'opérateur, on peut parler de rôles adaptables (cf. 2.3.3).

Les deux modes de fonctionnement sont représentés selon la modélisation du système cobotique (cf. Figure 56 et Figure 57).

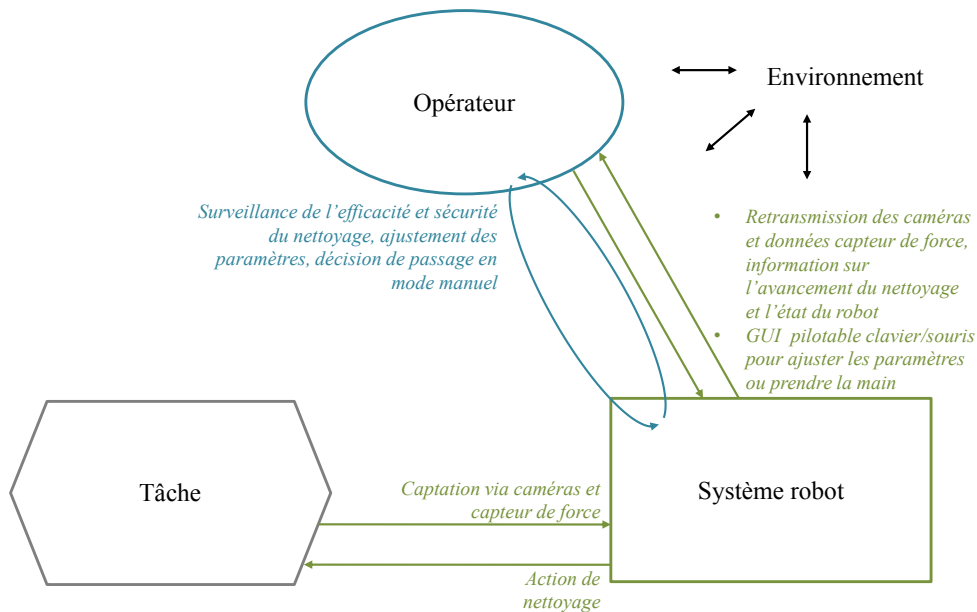


Figure 56 : Schéma du principe de solution du nettoyage des cuves, mode « cycle automatique »

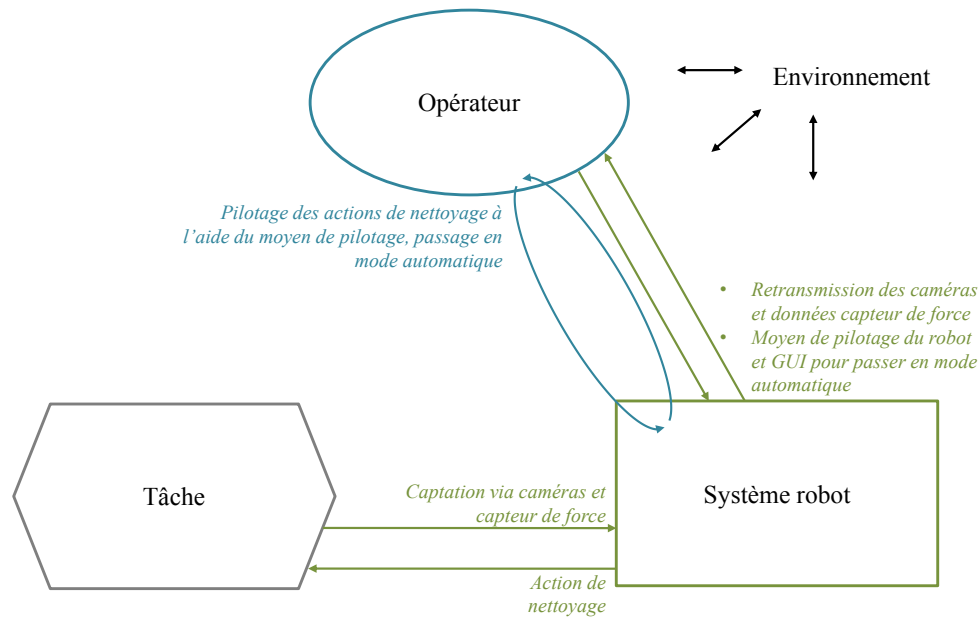


Figure 57 : Schéma du principe de solution du nettoyage des cuves, mode « téléopération » avec joystick

La modélisation d'un principe de solution ne fixe en aucun cas l'activité future. Elle en décrit un fonctionnement potentiel réaliste, puisqu'elle est basée sur l'analyse de l'activité actuelle et des compétences en robotique industrielle.

De plus, la modélisation est théorique, et doit être confrontée aux conditions réelles au travers de simulations, auxquelles participent les parties prenantes du projet dont les opérateurs.

Les éléments représentés par la modélisation sont simulés avec une représentativité correspondant aux besoins et contraintes industrielles.

4.2.3 Simulations et essais pour le principe modélisé

Le principe de solution de nettoyage a été discuté avec les parties prenantes du projet. Une vidéo d'un scénario simplifié a été développée par le doctorant roboticien avec le logiciel V-REP. Ce support de simulation, très en amont du projet, a été évalué lors des séances de travail avec le groupe « nettoyage des cuves » et avec les opérateurs. Cela a permis d'avoir immédiatement une idée commune du principe de solution envisagé et de soulever les difficultés à venir. Il peut également permettre de corriger des erreurs initiales de conception ou de faire émerger des idées nouvelles. Dans notre cas, nous avons recueilli des données sur l'encombrement de l'atelier, les risques potentiels de la solution, et l'acceptabilité de la solution.

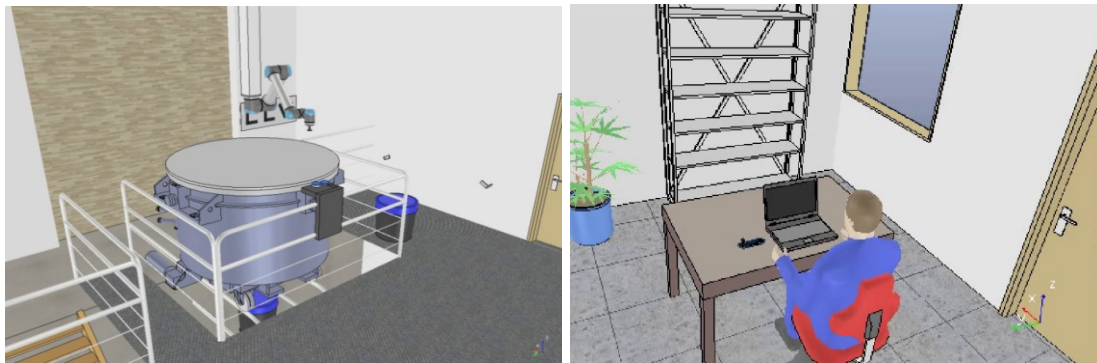


Figure 58 : Captures d'écran du principe de solution simulé sous V-REP

Parmi les éléments représentés sur la modélisation du principe de solution, la simulation dispose des éléments suivants (cf. Figure 59) :

- l'environnement de l'atelier a été précisément simulé pour une favoriser la projection vers l'activité future ;
- l'homme dans son poste de commande sont représentés, mais le détail de la collaboration avec le robot n'apparaît pas (pour alléger le développement et parce que les modalités d'interaction ne sont alors pas définies) ;
- le comportement du robot a été simulé par une trajectoire très simple dans la cuve ;
- un déplacement du robot par des axes linéaires supplémentaires a été mis au point pour atteindre des positions de garage et de maintenance ;
- plusieurs phases annexes du nettoyage, dont le changement d'outil, ont été esquissées pour discuter de la compatibilité de la solution envisagée avec la production ;
- le procédé de nettoyage ne sont pas représentés (pour alléger le développement informatique, parce qu'ils sont extrêmement complexes à modéliser numériquement, et parce qu'ils ne sont alors pas encore définis).

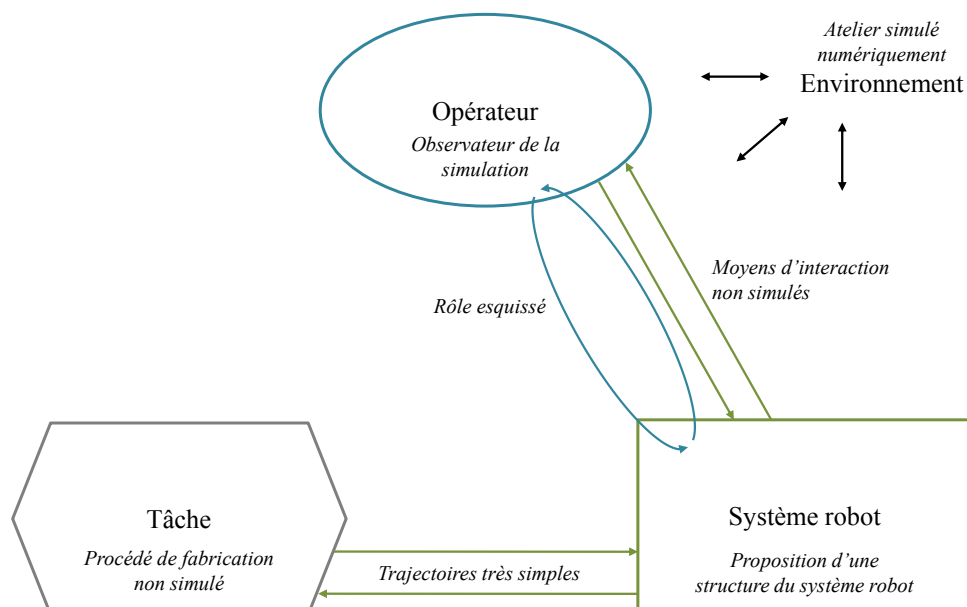


Figure 59 : Schéma de simulation d'un principe de système cobotique de nettoyage des cuves

L'ébauche d'un principe de solution et de l'analyse des risques projet ont mis en évidence la nécessité de réaliser des essais complémentaires sur l'hydrogommage. Pour rappel, l'hydrogommage est le

procédé de nettoyage qui nous a été recommandé au début de l'étude. Les essais furent infructueux notamment en raison d'une mauvaise évacuation du produit et de la difficulté de traiter les déchets résultants. Ce revirement de situation dans le projet nous a confortés dans l'idée qu'il faut privilégier une approche plaçant le besoin plutôt que la technologie au centre des préoccupations des acteurs du projet.



Figure 60 : Photographie de l'essai de nettoyage des cuves par hydrogommage

Outre le procédé de nettoyage, nous avons identifié deux autres points cruciaux.

D'abord, le rôle des opérateurs à distance des opérations (supervision et pilotage), leur représentation de la situation grâce aux caméras et autres capteurs, les moyens de pilotage du robot, et la transformation de l'activité de travail. Pour cela, nous avons étudié spécifiquement ces modes de fonctionnement (cf. 4.2.4) et réalisé une maquette interactive détaillée (cf. 4.3).

Ensuite, la faisabilité technique robotique sera évoquée dans ce manuscrit, et discutée plus précisément dans la thèse de David Bitonneau. Cette faisabilité a principalement été développée à l'aide d'échanges avec des fournisseurs et d'un prototype (cf. 4.4).

4.2.4 Supervision et téléopération

Les rôles et moyens de supervision et de téléopération (pilotage à distance) étant les pistes privilégiées pour le projet nettoyage des cuves, nous avons considéré qu'ils méritaient ici une section à part entière, en particulier sur le poste de commande, ils sont complémentaires à ce qui a été déjà décrit au deuxième chapitre.

Pour un cas de téléopération d'un robot ou système robotique par l'opérateur, le poste de commande est le moyen pour celui-ci d'interagir. Il constitue l'interface technique entre l'opérateur et le processus industriel (Thibault, 2000). Lors de la conception d'un système de téléopération, il faut veiller à l'intégration des données issues des capteurs pour réduire la charge cognitive, à une compensation de la perte d'information (auditive, haptique et visuelle), à l'amélioration de la représentation spatiale de l'environnement, et aux possibilités des opérateurs de comprendre/d'anticiper les actions du système. De plus, trouver l'équilibre entre contrôle manuel et automatique et être vigilant avec le syndrome « hors de la boucle⁹⁵ » est déterminant pour limiter la complaisance et le rôle passif des opérateurs (Endsley & Kiris, 1995).

⁹⁵ Traduit de l'anglais *out-of-the-loop*, signifiant que l'homme n'est pas inclus dans la boucle de décision.

Sheridan (1992) illustre les différents intermédiaires de représentation de la situation entre le robot et l'opérateur, ce qui permet de voir les difficultés de conscience des actions du robot (Figure 61). Il peut y avoir des écarts, des perturbations entre la situation réelle et ce qui est capté par l'ordinateur (3. sur le schéma), puis lors de la retransmission des informations à l'opérateur (2.). Ensuite, l'opérateur construit sa conscience de la situation en fonction des données affichées (1.). En fonction de celles-ci et de son expertise, il agit grâce au moyen de pilotage (4.), qui permet un ensemble d'actions pour piloter le robot réel. Chaque intermédiaire est une source d'erreur à prendre en compte dans la conception de moyens de téléopération.

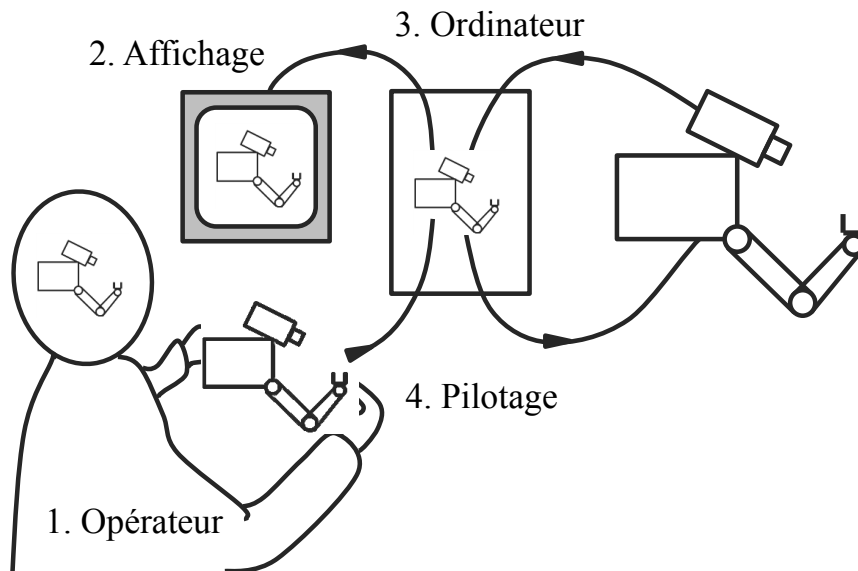


Figure 61 : Les quatre lieux de représentation du robot (Sheridan, 1992)

Dans un poste de commande, un opérateur ne peut être vigilant à tout moment, être omniscient. Il fait forcément des erreurs. Le rôle du système d'alarme est d'aider l'opérateur à repérer ces erreurs ou autres anomalies, et à les corriger (Thunberg & Osvalder, 2007). Pour qu'une alarme soit utile, il faut qu'elle :

- soit pertinente pour l'opérateur et prenne en compte la tâche qu'il doit accomplir ;
- informe sur l'état du système et sur ce qui l'a causée ;
- indique clairement les actions nécessaires au rétablissement de la situation ;
- se présente au bon moment et à une fréquence qui correspond à ce que peut gérer l'opérateur ;
- soit simple à détecter et à interpréter.

La consultation de différents retours d'expérience comme l'analyse de l'activité pour une salle de contrôle d'une cimenterie (Sagar, 2001), l'intégration de l'homme dans la démarche de conception des situations de conduite des TGV (Sagot & Gomes, 2003), la conception d'interface de supervision (Ponsa, Vilanova, Diaz, & Goma, 2008) ou plus généralement la téléopération (Adamides, Christou, Katsanos, Xenos, & Hadzilacos, 2015), ont été riches en enseignements (exemple Figure 62). Ces auteurs proposent de nombreuses recommandations sur la téléopération et la conception d'interfaces de supervision, les illustrant avec des cas d'application dont nous nous inspirerons dans les prochaines étapes de simulation.

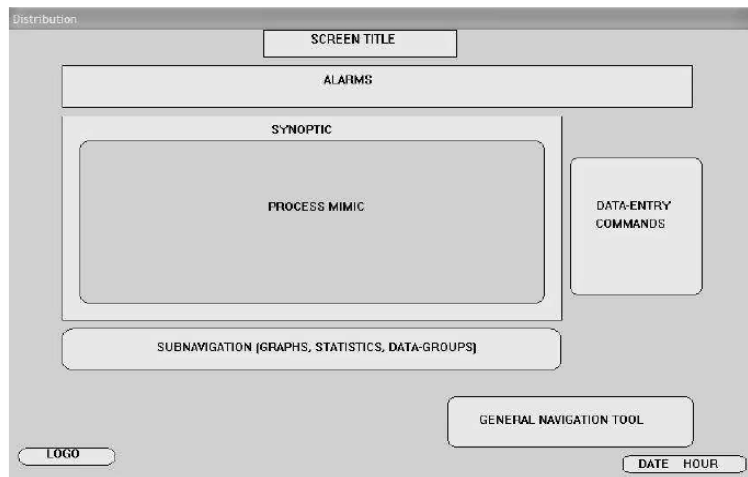


Figure 62 : La disposition des éléments sur l'interface de supervision (Ponsa, Amante, & Diaz, 2010)

4.3 Études de base et maquette interactive

Les études de base coïncident avec le *HIRL 4*, c'est-à-dire à la simulation participative des interactions homme-robot à l'aide d'une maquette.

4.3.1 Objectifs et hypothèses

Suite à l'analyse et à la définition du besoin, un principe de solution a été fiabilisé en consultant et échangeant avec plusieurs fournisseurs. Ce principe a ensuite été retenu par le groupe « nettoyage des cuves ». Le système envisagé est composé d'un robot téléopéré (pour des raisons de sécurité) suspendu au-dessus de la cuve (pour limiter l'encombrement dans l'atelier et la taille du robot), fixé à une poutre robotique lui permettant d'atteindre toutes les parties de la cuve, de changer d'outil et de se dégager de la cuve pour les modes transitoires et dégradés. L'étude a évalué les deux modes de fonctionnement de la solution envisagée : la supervision et le pilotage.

Pour rappel, les résultats des simulations sont utilisés dans le projet pour contribuer à la conception. La contribution est méthodologique. L'objectif de cette simulation est alors d'évaluer, pour l'étape de raclage :

- la supervision pour la portion automatique du cycle (raclage des parois) ;
- le retour d'informations proposé à l'utilisateur, la facilité de se repérer en trois dimensions dans l'atelier et dans la cuve ;
- le pilotage du robot simulé⁹⁶ par :
 - le clavier (moyen d'interaction très répandu, précis et proposant une faible marge de manœuvre) ;
 - un joystick (moyen d'interaction mature mais moins répandu, moins précis mais proposant une plus grande marge de manœuvre, plus de liberté dans l'interaction).

L'objectif secondaire était de recueillir de façon plus superficielle des éléments sur la nécessité de former les opérateurs au pilotage, sur l'appropriation du système par les opérateurs et sur l'intérêt de la simulation.

⁹⁶ Le moyen de pilotage du robot a été choisi à partir de l'état de l'art des moyens d'interaction présenté précédemment (cf. 2.2.3).

Le support mis au point est une maquette interactive numérique basée sur le logiciel de simulation robotique V-REP (Rohmer, Singh, & Freese, 2013). Nous avons restreint, pour limiter le temps de développement et le temps de passage des tests, le scénario à l'étape de raclage : opération à réaliser sur toute la surface interne, avec un contrôle visuel. Le support de la simulation était peu représentatif du point de vue du procédé mécanique (simulation des caractéristiques du produit), nous avons préféré mettre l'accent sur la représentation de l'atelier, de la cuve, le placement des caméras et sur le pilotage du robot (cf. Figure 63).

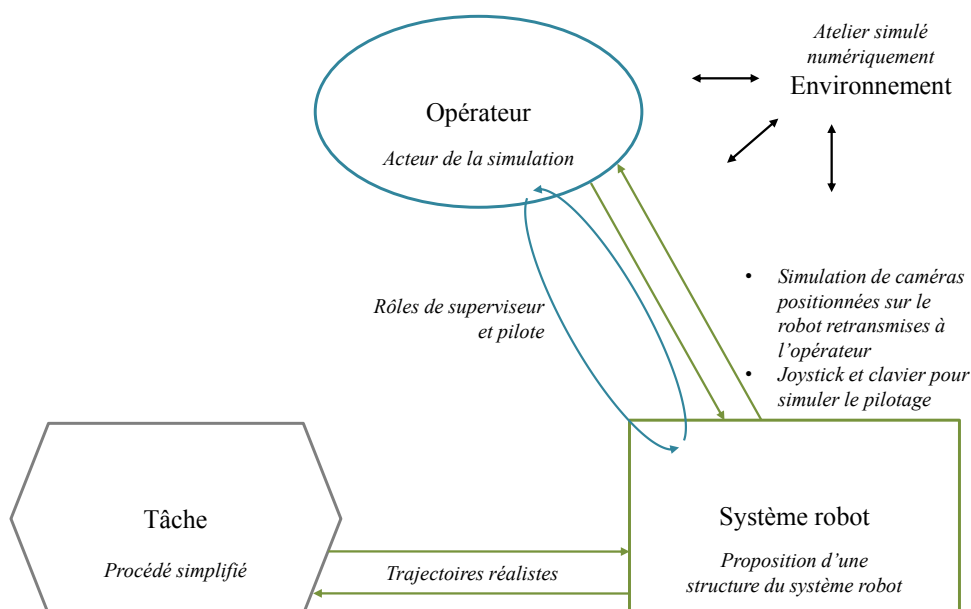


Figure 63 : Schéma de simulation interactive d'un système cobotique de nettoyage des cuves

Cinq étudiants de l'ENSC⁹⁷ ont évalué une première version du test, que nous avons perfectionnée avant le lancement des séances de simulation définitive. Puis dix employés novices (7 femmes et 3 hommes salariés de l'entreprise, âgés de 23 à 52 ans) et huit opérateurs (uniquement des hommes de 26 à 49 ans) experts du nettoyage manuel des cuves ont participé au test durant 30 minutes.

4.3.2 Protocole de test

L'utilisateur commence par remplir un questionnaire. Ensuite, il réalise le test en suivant le déroulé opératoire qui lui est donné en version papier. Il termine par un nouveau questionnaire. Pour celui-là, nous nous sommes inspirés de l'étude menée par Weistroffer et al. (2014). Ils ont mis au point un questionnaire pour l'acceptabilité des interactions homme-robot, basé sur les travaux de Bartneck et al. (2009), auquel ils ont ajouté des questions sur la sécurité, l'utilité, l'efficacité, l'acceptabilité, la coprésence et la distance homme-robot.

Pendant le test, l'utilisateur déroule le scénario à l'aide d'une interface graphique et pilote le robot à l'aide du clavier ou du joystick.

⁹⁷ École Nationale Supérieure de Cognitique, école d'ingénieurs qui fait partie de l'Institut National Polytechnique de Bordeaux (Bordeaux INP).



Figure 64 : Photographie d'un utilisateur réalisant un test avec la maquette interactive

L'affichage sur l'écran est séparé en quatre (cf. Figure 65) :

1. une vue « outil » ;
2. une vue intermédiaire pour permettre d'observer la configuration du robot ;
3. une visualisation globale du système ;
4. une interface graphique (présentant des données et boutons).

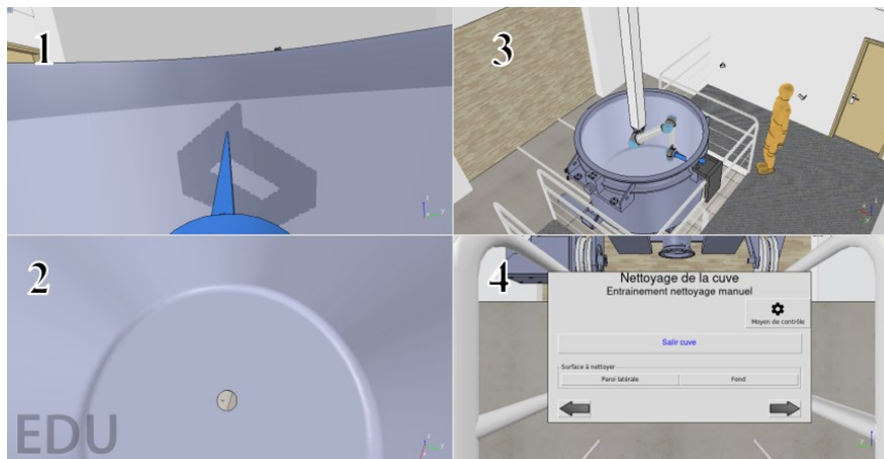


Figure 65 : Affichage sur l'écran pendant le test utilisateur avec la maquette interactive

Un scénario partiel de nettoyage a été implémenté. Il comprend une portion de cycle automatique, puis un entraînement libre au pilotage manuel (pour réduire l'effet d'apprentissage), et enfin un nettoyage chronométré de plusieurs tâches avec le joystick et le clavier, en intervertissant l'ordre entre chaque participant.

4.3.3 Résultats

Dans cette partie, les conditions « pilotage avec le clavier » et « pilotage avec le joystick » seront notées PC et PJ. Les résultats des novices et des opérateurs sont analysés ensemble puisque les tests d'ANOVA à un facteur contrôlé ont révélé que la durée de la tâche est la même pour ces deux populations pour PC ($F = 0,01$; $p = 0,925$) et PJ ($F = 0,14$; $p = 0,716$).

La supervision du cycle automatique a été évaluée par un questionnaire (proposant des échelles de Likert à cinq niveaux) dont les résultats sont présentés par la Figure 66. Les utilisateurs étaient globalement satisfaits de la supervision du cycle automatique (92,5 % en moyenne de satisfaction quant à la facilité, et 77,5 % en moyenne de satisfaction sur le placement des caméras).

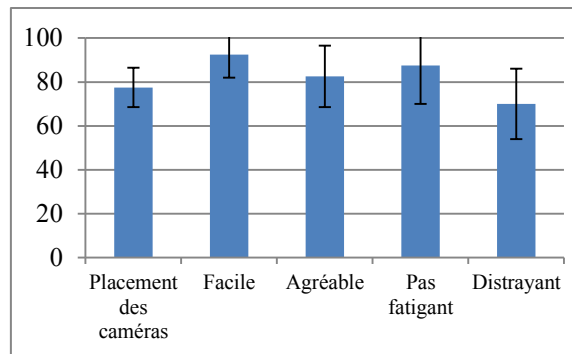


Figure 66 : Histogramme de satisfaction de la supervision du cycle automatique de la maquette interactive

Pour mesurer PC et PJ, nous avons utilisé deux moyens : la mesure de la performance (durée de nettoyage) et le questionnaire (proposant des échelles de Likert à cinq niveaux). Les principaux résultats sont présentés Figure 67 et Figure 68.

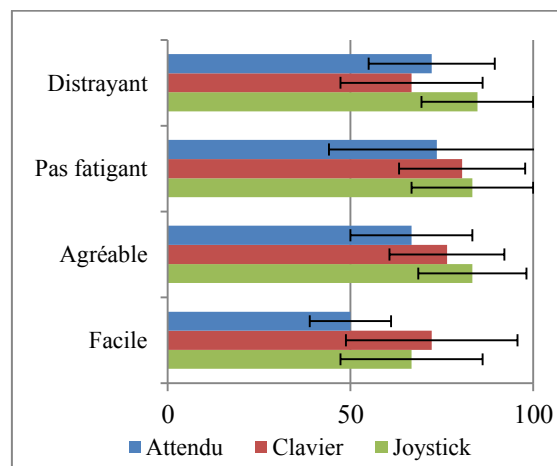


Figure 67 : Histogramme de Satisfaction (%) de PC et PJ, comparés aux attentes des utilisateurs

Le test de Wilcoxon confirme que PJ est significativement plus distrayant que PC ($W = 41$; $p = 0,038$), et que les deux moyens d'interaction sont aussi faciles à utiliser ($W = 23$; $p = 0,48$).

Par ailleurs, les utilisateurs ont globalement trouvé PC et PJ plus facile que ce qu'ils imaginaient avant de réaliser le test (69 % en moyenne de satisfaction avec PC et PJ confondus contre 50 % attendu par les utilisateurs).

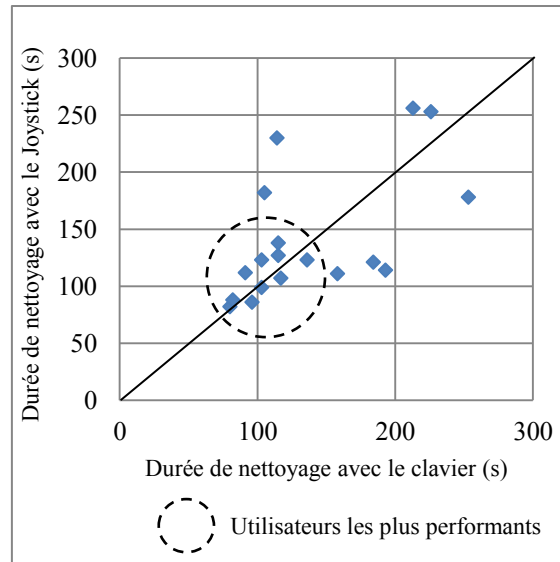


Figure 68 : Durée de PC et PJ pour chaque utilisateur par rapport à la droite « durée PC = durée PJ »

La différence entre la performance pour PC et PJ suit une loi normale, vérifiée par le test de Shapiro Wilk sur la normalité de la différence ($p > 0,1$). Le test t pour données appariées n'a montré aucune différence significative entre la performance avec le clavier et celle avec le joystick ($T = -0,22$; $p = 0,830$). Qualitativement, on remarque tout de même un groupe de 10 utilisateurs plus performants que les 8 autres avec les deux moyens de pilotage.

Bien que ne présentant pas de différence significative en termes de performance et de préférence par les opérateurs pour une tâche simplifiée, l'utilisation du joystick a été retenue comme plus pertinente que celle du clavier puisque présentant plus de flexibilité de mouvement (maîtrise de la vitesse et angle de trajectoire), ce qui est un atout pour la réalisation de la future tâche qui présentera plus de variabilités.

4.3.4 Discussion

Le dispositif expérimental proposé comporte plusieurs limites en ce qui concerne la représentativité de la simulation :

- le procédé de nettoyage est très sommairement simulé, l'accent a été mis sur les mouvements du robot et les interactions ;
- la fluidité des mouvements du robot lors des interactions ne tient pas compte de tous les paramètres du robot (comme son inertie par exemple, qui peut altérer l'interaction) ;
- la conscience des utilisateurs de la « virtualité » du robot.

De plus, toutes les situations de travail n'ont pas été simulées. En effet, seules deux situations (raclage automatique et téléopéré) ont été testées. Cela s'explique par les objectifs de cette étape de simulation, qui ne nécessitait pas un niveau de détail supérieur, toutes les autres situations étant discutées en parallèle avec le groupe « nettoyage des cuves ».

La maquette interactive mise au point a rendu possible très tôt dans le projet la simulation des situations futures confrontées aux contraintes du poste issues de l'analyse de l'existant, et aux contraintes techniques liées à l'interaction entre un robot et les opérateurs (futurs utilisateurs du dispositif). Nous avons également récolté des résultats sur le mode de supervision et de pilotage à distance du robot qui ont servi à concevoir le prototype (cf. 4.4) lors de l'étape suivante du projet.

Par ailleurs, nous avons obtenu d'autres résultats difficilement mesurables, mais attendus du fait de la participation des opérateurs à la simulation (cf. 3.3.4).

D'une part, les opérateurs ont pu enrichir la conception par leur expertise sur les opérations actuelles. Cette expertise a amené de nouveaux besoins, qu'il a fallu prendre en compte dans la conception. Par exemple, nous avons appris les contraintes liées aux futures compositions de propergol en cours de mise au point. À l'évidence, nous n'aurions pas récolté ce type d'information sans la participation des opérateurs.

D'autre part, les opérateurs étaient force de proposition pour faire évoluer la solution envisagée. Ils ont validé l'adéquation entre celle-ci et leurs besoins. Par exemple, certains d'entre eux ont exprimé la volonté d'être mieux informés sur l'état du robot, c'est-à-dire de savoir s'il est prêt pour être piloté, en mode automatique, ou s'il faut patienter. La maquette interactive a contribué à l'acceptation du système par les opérateurs.

La transition avec la phase suivante a été naturelle puisque le cahier des charges du prototype s'est focalisé sur les limites et basé sur les résultats des simulations avec la maquette interactive.

4.4 Études de détail et prototype

*Les études de détail consistent à évaluer la pertinence de la solution envisagée par la réalisation d'un prototype, et des simulations d'activité future impliquant notamment les opérateurs. Cette étape se rapporte au **HIRL 5**.*

4.4.1 Point sur la structure du projet

Le projet Ariane 6 a permis de poursuivre les études. D'une part, il a financé une mission dans l'usine guyanaise de Regulus, pour prendre en compte les données du poste de nettoyage des cuves 1800 G. D'autre part, il a financé un prototype qui servira par la suite à obtenir des éléments sur les activités humaines et robotiques futures, ainsi que sur la faisabilité technique d'industrialiser la solution envisagée.

Les analyses faites sur place ne sont pas détaillées ici pour des raisons de confidentialité. Nous avons pris en compte les spécificités du poste pour mettre au point le prototype lui étant dédié. Les principales différences sont les dimensions de la cuve (diamètre et hauteur environ deux fois supérieurs), la viscosité du propergol (plus fluide), et les conditions climatiques (température et humidité importantes). Pour autant, nous avons tenté de mettre au point un prototype qui corresponde autant que possible aux deux applications.

4.4.2 Objectifs et consultation de fournisseurs

Les simulations faites sur la maquette interactive présentent d'importantes limites (cf. 4.3.4), qui ont constitué avec les résultats de cette même simulation la base des objectifs et hypothèses faites pour le prototype de nettoyage des cuves. Ayant des ressources limitées pour le prototype, comme dans tout projet industriel, nous avons choisi de simuler ce qui semblait prioritaire au groupe « nettoyage des cuves », c'est-à-dire les modes de fonctionnement envisagés (supervision d'un cycle automatique et téléopération), et deux moyens d'interaction : le joystick retenu suite aux essais précédents et un dispositif haptique⁹⁸ pour explorer ses possibilités et disposer d'une plus grande flexibilité de

⁹⁸ Plus de détails sur les dispositifs haptiques sont disponibles au 2.2.3.

mouvement. Plusieurs hypothèses ont été émises par le groupe de travail, à partir de l'expérience du poste et d'intuitions vis-à-vis de la solution :

1. Évaluer la supervision pour la portion automatique du cycle.

Hypothèse

Les situations de supervision sont représentatives des conditions réelles.
Le placement et la visualisation des caméras sont adaptés pour la supervision du robot.
L'écran de données fourni est adapté pour la supervision du robot.

2. Évaluer la performance (qualité, productivité et utilisabilité) du pilotage du robot par :
 - le joystick,
 - le dispositif haptique.

Hypothèse

Le pilotage à l'aide du joystick est plus efficace que le pilotage à l'aide du dispositif haptique.

3. Évaluer la disposition des écrans, le positionnement des caméras et le repérage dans l'espace de l'utilisateur pour le pilotage.

Hypothèses

La disposition des écrans est adaptée.
L'affichage proposé sur les écrans permet de se repérer dans la cuve.
Le placement et la visualisation des caméras sont adaptés pour le pilotage du robot en fond de cuve et sur la paroi.

4. Évaluer l'acceptabilité du pilotage à distance et du prototype.

Hypothèses

Le pilotage d'un robot est plus facile que ce que l'utilisateur (sujet du test) avait imaginé.
Le pilotage d'un robot est moins agréable que ce que l'utilisateur l'imagine du pilotage d'un robot.
Le pilotage d'un robot est moins distrayant que ce qu'attendent les utilisateurs du pilotage d'un robot.
Le pilotage d'un robot avec le dispositif haptique est plus distrayant qu'avec le joystick.

5. Évaluer la représentativité des situations réelles.

Hypothèses

Les process sont représentatifs des situations de lavage (raclage, grattage et essuyage).

Afin d'être épaulés techniquement et de disposer des équipements nécessaires, nous avons consulté plusieurs entreprises par un appel d'offre. La consultation a été faite par l'intermédiaire du Cluster Aquitaine Robotics, association regroupant les acteurs néo-aquitains dans la robotique et la cobotique.

Nous avons eu trois réponses :

- Entreprise A : réponse mature et correspondant au besoin, mais le fournisseur n'est pas tout à fait spécialiste de la téléopération et géographiquement éloigné (gênant en particulier pour l'implication du roboticien David Bitonneau et la logistique des tests utilisateur).
- Entreprise B : réponse non satisfaisante (coût important et réponse technique moins pertinente).
- CEA Tech : expert en téléopération, proche géographiquement et moins onéreux.

Nous avons choisi le CEA Tech pour coréaliser et accueillir le prototype qui sera, conformément à notre demande, développé en quatre phases :

- phase 1 : approvisionnement et intégration du robot, du dispositif haptique, du joystick, de la réplique de cuve, du produit inerte⁹⁹ pâteux à nettoyer, des outils du robot ;
- phase 2 : mise au point des procédés de nettoyage et essais de fonctionnement simples de faisabilité ;
- phase 3 : essais globaux et simulations participatives ;
- phase 4 : démonstrations pour avoir des retours et montrer les résultats de la démarche en interne à Ariane Group.

Le matériel approvisionné lors de la phase 1 est illustré sur les figures ci-dessous. L'interfaçage entre les différents dispositifs et briques logicielles a été réalisé par le CEA Tech.



Figure 69 : Photographies du prototype du système cobotique de nettoyage des cuves

4.4.3 Mise au point et essais simples

Le développement robotique du prototype est plus précisément détaillé dans la thèse de David Bitonneau. En collaboration étroite avec le CEA Tech, nous avons mis au point les différentes étapes des procédés de nettoyage (raclage, grattage, essuyage et contrôle de propreté). Ces étapes sont réalisables avec deux modes de fonctionnement : un mode « cycle automatique », lors duquel l'opérateur a un rôle de supervision, et un mode « téléopération », lors duquel il pilote le robot en temps réel avec un dispositif haptique ou avec un joystick. Le procédé de nettoyage est assuré par le robot à l'aide d'un contrôle en effort¹⁰⁰. Nous avons par ailleurs eu une attention particulière au positionnement des caméras, qui avait déjà été initié à l'aide de la simulation précédente.

⁹⁹ Le produit inerte est un produit non pyrotechnique ayant des propriétés mécaniques très proches du propergol pâteux.

¹⁰⁰ Le contrôle en effort consiste ici à maintenir un effort constant vers les parois de la cuve pendant les mouvements du robot le long de ces parois (Bitonneau, 2018).

Un élément du poste de commande n'avait alors pas encore été évalué : l'interface graphique de supervision. Ainsi, nous avons mis au point en quelques heures une maquette de cette interface graphique¹⁰¹. Nous avons proposé le scénario résultant aux opérateurs et avons ainsi pu l'améliorer avant et après le test utilisateur impliquant le prototype.

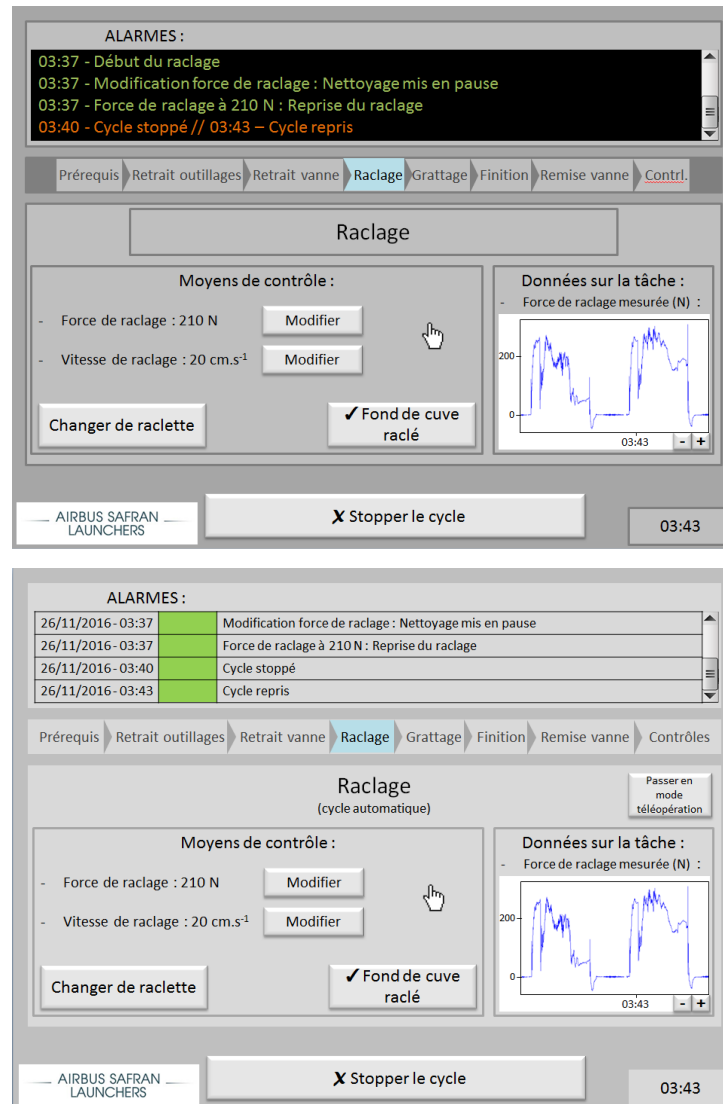


Figure 70 : Captures d'écran de la maquette d'interface graphique avant (capture en haut) et après (capture en bas) discussion avec les opérateurs

Le système simulé est décrit par le schéma de la Figure 71.

¹⁰¹ L'interface a été réalisée en se basant sur les principes de supervision et téléopération déjà évoqués (cf. 2.4.4 et 4.2.4).

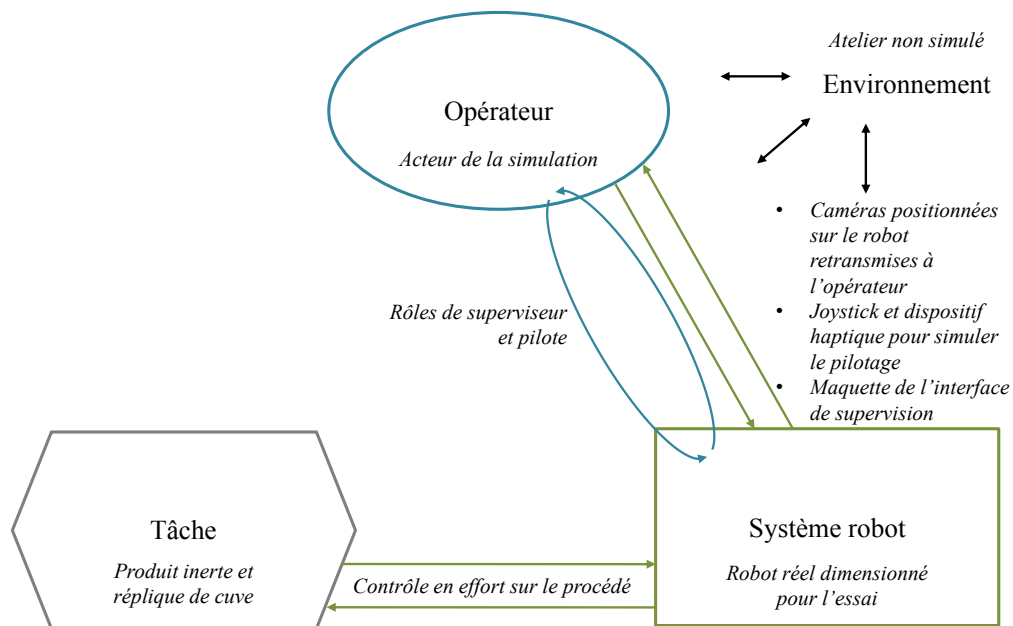


Figure 71 : Schéma du prototype d'un système cobotique de nettoyage des cuves

4.4.4 Simulation participative

Pour répondre aux objectifs, un protocole d'essai impliquant les opérateurs a été mis au point, en quatre étapes :

1. explications de l'objectif du test, du fonctionnement du prototype, des conditions expérimentales, sur le poste de commande ;
2. questionnaire préliminaire (cf. Tableau 29) sur l'âge, la CSP, la latéralité, le sexe, l'expérience au poste et vis-à-vis de la technologie, et les attentes envers la collaboration avec le robot ;
3. simulation avec scénario :
 - raclage (cycle automatique et supervision, prise en main pour racler les résidus avec joystick et dispositif haptique),
 - grattage (idem),
 - contrôle visuel (sommairement à travers les écrans, puis en réel) ;
4. questionnaire (cf. Tableau 30) : retours sur l'utilisation.

Age :

Sexe : M / F Gaucher Droitier

Catégorie socio-professionnelle :

1	Agriculteurs exploitants	6	Ouvriers
2	Artisans, commerçants et chefs d'entreprise	7	Retraités
3	Cadres et professions intellectuelles supérieures	8	Etudiant
4	Professions intermédiaires	9	Autre personne sans activité professionnelle
5	Employés		

Utilisation d'un joystick :

Jamais Une ou deux fois Rarement De temps en temps Très régulièrement

Utilisation d'un clavier et d'une souris :

Jamais Une ou deux fois Rarement De temps en temps Très régulièrement

Connaissances en robotique :

Je ne sais pas ce que c'est J'en ai déjà entendu parler (TV, journaux) J'en entends parler/discute régulièrement Je me suis renseigné/j'ai suivi une formation Je suis au fait des dernières avancées et connais ses enjeux

Avez-vous déjà participé à des tests utilisateur : oui / non

Avez-vous déjà organisé des tests utilisateur : oui / non

Connaissez-vous le poste de travail raclage des cuves de propergol : oui / un peu / non

Le pilotage à distance d'un robot est selon vous :

Difficile	1	2	3	4	5	Facile
Désagréable	1	2	3	4	5	Agréable
Fatigant	1	2	3	4	5	Pas fatigant
Ennuyeux	1	2	3	4	5	Distrayant

Tableau 29 : Questionnaire préliminaire au test utilisateur du prototype de nettoyage des cuves

Le pilotage à l'aide du dispositif haptique (ou joystick) vous a semblé :						
Paroi : Difficile	1	2	3	4	5	Facile
Fond : Difficile	1	2	3	4	5	Facile
Général :						
Désagréable	1	2	3	4	5	Agréable
Fatigant	1	2	3	4	5	Pas fatigant
Ennuyeux	1	2	3	4	5	Distrayant
Inefficace	1	2	3	4	5	Efficace
L'écran caméra de gauche vous a été utile :						
Pas du tout	1	2	3	4	5	Tout à fait
L'écran caméra de droite vous a été utile :						
Pas du tout	1	2	3	4	5	Tout à fait
Quel moyen de pilotage avez-vous préféré :						
Commentaires :						

Tableau 30 : Extrait de questionnaire suivant le test utilisateur du prototype de nettoyage des cuves

En raison de contraintes de production d'Ariane Group, 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. Les résultats des simulations participatives avec le prototype sont donc qualitatifs. Les tests avec opérateurs ont produit les résultats triés dans le Tableau 31.

<i>Catégorie</i>	<i>Principales remarques</i>
<i>Conditions actuelles</i>	<p>Faut-il utiliser du plastifiant sur le fond de cuve ?</p> <p>Attention aux cristaux formés sur le haut des parois.</p> <p>Attention à ne pas abîmer la cuve.</p> <p>Attention au produit qui colle à la raclette.</p> <p>Attention à l'angle fond de cuve.</p> <p>L'étape au chiffon semble indispensable.</p>
<i>Système visuel futur</i>	<p>Caméras :</p> <ul style="list-style-type: none"> - angle de vue des caméras trop petit ; - la vue de la caméra « outil » est utilisée en continu ; - la vue de la caméra « cuve » est utilisée ponctuellement ; - abaisser la caméra « outil » pour le fond. <p>Écrans :</p> <ul style="list-style-type: none"> - « cuve » : utile pour ne pas choquer la cuve et avoir une vision globale ; - « outil » : vision du process. <p>Repérage dans la cuve :</p> <ul style="list-style-type: none"> - difficile d'apprécier la distance poignet robot-cuve ; - difficile de se repérer dans la cuve ; - difficile de se situer dans la cuve.
<i>Moyen de pilotage futur (joystick et haptique)</i>	<p>Haptique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - le robot est rapide ; - le moyen de pilotage « marche bien, répond bien » ; - il n'est pas évident à prendre en main ; - l'origine du retour de force n'est pas évidente (issu du process, inertie robot, bras maître...) ; - difficile de savoir avec quelle force manipuler, d'avoir conscience de l'homothétie en effort ; - il manque 1 degré de liberté sur la paroi latérale ; - lors du recalage, on perd le mouvement en cours ; - le nettoyage de la paroi latérale semble plus difficile, les utilisateurs appuient plus fort, adoptent des postures inconfortables en particulier pour le poignet, les mouvements de sont pas fluides ; - le moyen haptique est très « flexible », on peut réaliser une grande variété de mouvements ; - il a semblé plus « distrayant » mais plus « difficile à utiliser » à certains. <p>Joystick :</p> <ul style="list-style-type: none"> - ce moyen est plus précis, plus maniable et plus confortable ; - il semble également plus lent, ce qui peut être dû aux limites des développements du pilotage avec le joystick ; - les opérateurs ont l'air plus à l'aise avec le joystick. <p>En général :</p> <ul style="list-style-type: none"> - il est difficile d'anticiper les butées ; - l'anticollision semble indispensable ; - un voyant lorsqu'il y a contact serait utile (en particulier pour le joystick mais pas seulement) ; - un voyant de butée d'axes (pour le robot et/ou le bras haptique) permettrait de comprendre l'origine du retour d'effort.
<i>Plus généralement</i>	<p>La possibilité d'entendre les opérations est importante pour une meilleure immersion.</p> <p>Les utilisateurs préfèrent passer une fois plus lentement que deux fois rapidement.</p>

Tableau 31 : Récapitulatif des principaux résultats des essais du prototype avec les opérateurs du nettoyage de cuves

Nous avons également organisé des essais avec les services industrialisation, maintenance et procédés. Cela nous a permis d'anticiper les difficultés éventuelles pour mettre en service et maintenir le système final. Par exemple, la prise en compte des contraintes liées à la pyrotechnie ont été précisées, il faudra pour cela autant que possible prévoir des butées logicielles mais aussi mécaniques, être redondant dans les systèmes de sécurité. Des recommandations sur l'optimisation des outils et sur l'éclairage de la cuve pour mieux détecter les traces de propegol ont été faites en ce sens.

La comparaison entre le nettoyage des cuves avec le joystick et avec le dispositif haptique est résumée dans le Tableau 32. Les principales différences, d'après les personnes ayant évalué le prototype sont que le joystick est plus mature et moins cher que le dispositif haptique, mais que celui-ci permet une plus grande variété de mouvements, une meilleure flexibilité.

	<i>Joystick</i>	<i>Dispositif haptique</i>
<i>Performance</i>	=	=
<i>Facilité du premier usage</i>	+	=
<i>Représentation spatiale</i>	+	-
<i>Flexibilité</i>	-	++
<i>Utilisabilité</i>	=	=
<i>Prix</i>	+	--
<i>Maturité</i>	+	--
<i>Risque d'erreur</i>	=	-
<i>Acceptabilité</i>	+	++

Tableau 32 : Tableau comparatif du joystick et du dispositif haptique pour l'application nettoyage des cuves

Les tests ont donc produit les résultats principaux suivants :

- une évaluation des modes de supervision et de téléopération ;
- un perfectionnement du positionnement des caméras ;
- une prise en compte des conditions réelles ;
- le besoin d'une étude pour optimiser les effecteurs ;
- le besoin d'une étude de sécurité pyrotechnique poussée (butées mécaniques et logicielles, limitation de la force et des impacts, compatibilité chimique, etc.) ;
- la satisfaction des opérateurs et autres participants de pouvoir contribuer à la conception et à l'évaluation.

Enfin, un autre avantage du prototype a été de démontrer l'intérêt de la démarche par simulation pour aboutir à un système cobotique. Nous avons organisé des visites par petits groupes, lors desquelles 70 personnes d'Ariane Group et Safran Group ont pu constater l'intérêt de la démarche, et piloter le robot pour racler du produit inerte en téléopération.

Les visiteurs étaient des personnes en charge de l'Industrie du Futur, des projets robotique, de la mise au point de nouveaux procédés, de l'industrialisation, de la production, de la santé/sécurité au travail, et de la maintenance. Elles partagent désormais la même représentation du projet, des possibilités de la

téléopération, et plus généralement de l'approche méthodologique. Le prototype de nettoyage des cuves a eu un rôle pédagogique important auprès des visiteurs.

Dans ce chapitre, nous avons expérimenté une approche interdisciplinaire pour les phases amont de la conception, menant à un niveau de maturité correspondant au HIRL 5. Les prochaines étapes d'industrialisation doivent mener à un HIRL 9, système mis en service sur lequel la nouvelle activité est analysée et ajustée aux conditions réelles. Les perspectives et limites de la démarche seront traitées au chapitre suivant.

Chapitre 5 Déploiement de la méthodologie

L'application d'une méthodologie innovante pour Safran et Ariane Group perd de son intérêt si elle reste une pratique unique et isolée. Pour éprouver la méthodologie et valider son caractère transposable, nous l'avons répliquée sur d'autres projets/sujets. De plus, pour faciliter sa mise en œuvre, nous avons amorcé le développement d'outils. Ce chapitre présente également une discussion sur l'approche et ses applications. Finalement, il traite des perspectives pour la cobotique dans l'Industrie du Futur.

5.1 Transfert de l'approche méthodologique

Transférer l'approche méthodologique consiste à l'appliquer à d'autres projets et à la diffuser dans l'entreprise. Étant intégrés au sein d'Ariane Group, David Bitonneau et moi-même avons pu constater d'autres besoins industriels, et confronter l'approche aux situations réelles de l'entreprise. Nous avons également confronté l'approche plus largement dans le groupe en la présentant à de nombreuses reprises, et en échangeant lors de groupes de travail thématiques sur la cobotique, la robotique et l'ergonomie.

5.1.1 Activité de finition d'objet pyrotechnique

Le deuxième projet sur lequel nous avons travaillé concerne l'opération de « retrait des voiles ». Le retrait des voiles est un poste déterminant pour Ariane Group, puisqu'il est la dernière étape de fabrication des chargements, autrement dit la finition de ces grands objets pyrotechniques de plusieurs mètres de long. Elle consiste à retirer les surplus de produit pyrotechnique solide¹⁰² présents à l'intérieur du chargement, dans le canal. Ces sortes de défauts peuvent être des poussières, des surépaisseurs, ou des copeaux plus ou moins grands, plus ou moins collés à la paroi interne, et peuvent être situés à n'importe quel endroit dans le chargement. Ils sont nommés les « voiles ».

Actuellement, la technique de retrait d'un voile est choisie par l'opérateur qui, en fonction de ce qu'il perçoit, adapte sa tactique et ses actions. Les gestes doivent être très maîtrisés afin de retirer le voile sans générer de risque pyrotechnique et sans abîmer le chargement, deux événements critiques qu'il faut éviter à tout prix. Les opérations sont réalisées au plus près du chargement. Ce qui a motivé le choix de ce sujet par les équipes de production a été la forte volonté de placer les opérateurs hors de la zone d'effet pyrotechnique pendant l'activité de retrait des voiles, ainsi que le besoin présumé

¹⁰² À ce stade de la fabrication, le propergol est solide, son apparence est semblable à de la gomme à effacer.

d'expertise humaine pour appréhender tous les types de voiles dans tous les emplacements en maîtrisant les risques.

Afin d'évaluer le transfert de la méthodologie, et la façon dont d'autres personnes pouvaient l'appliquer, nous avons recruté deux stagiaires pour travailler en binôme robotique/cognitive 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 chef d'atelier, méthodiste, industrialisation, sécurité, procédés de fabrication, IRP.

L'analyse de l'activité qu'ils ont effectuée a amené des résultats importants pour le projet :

- constatation des besoins en termes de sécurité, mais aussi découverte 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-tactiques-opérations des opérateurs ;
- élargissement du périmètre du projet en y ajoutant le contrôle final par endoscopie, pour gagner en qualité et en temps de cycle.

Par ailleurs, les opérateurs ont été très satisfaits de la démarche menée, et les échanges avec eux ont été très constructifs. Sur cette base, les stagiaires ont rédigé, avec l'appui du groupe de travail, l'analyse fonctionnelle à laquelle le système doit répondre.

Ainsi, au fil des discussions et avec l'appui de fournisseurs, un premier principe de solution a été proposé. Comme pour le projet nettoyage des cuves, la supervision et la téléopération ont rapidement été privilégiées pour éloigner l'opérateur du milieu hostile. Ainsi, l'opérateur superviserait ou piloterait le robot depuis un poste de commande. Le robot serait de petite taille et fixé sur une poutre lui permettant d'entrer dans le chargement et d'en atteindre tous les points internes. La première étape pourrait être un scan 3D, pour la reconnaissance automatique des défauts. Puis pour chaque défaut, le robot viendrait automatiquement se positionner dans une « zone de travail » ; ensuite, piloté par l'opérateur à l'aide d'un bras à retour d'effort qui semble indispensable, le robot permettrait de le séparer du chargement et de l'évacuer. Enfin, un contrôle pourrait être réalisé à l'aide de la caméra placée sur le robot, sans manutention supplémentaire. Le principe de solution est résumé sur la Figure 72.

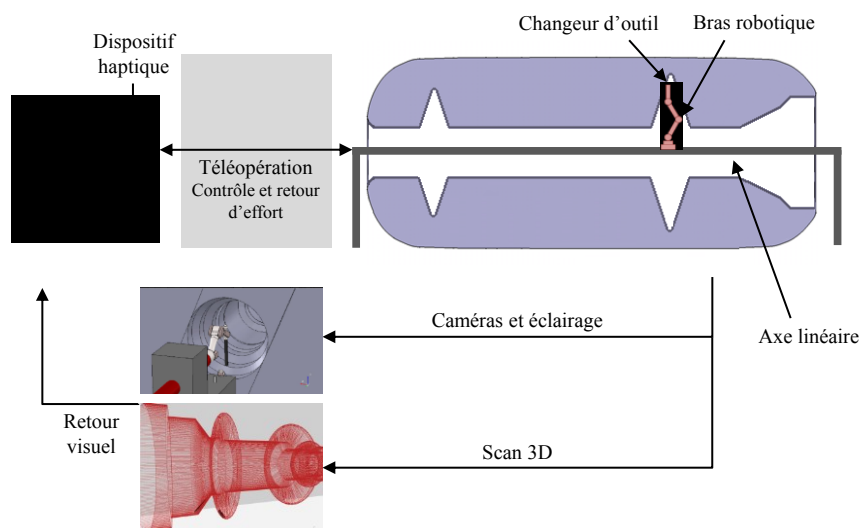


Figure 72 : Schéma du principe de solution pour le retrait des voiles

Ce projet étant de grande importance pour les équipes de production, les prochaines étapes sont d'ores et déjà planifiées. Comme pour le nettoyage des cuves (cf. 4.4), un premier prototype va être réalisé

avec un fournisseur, dans ses locaux. Puis il est prévu de réaliser un démonstrateur à l'échelle, avec et chez un fournisseur comme pour le projet de nettoyage des cuves. Ces deux étapes de réalisation intermédiaires se feront avec la participation des opérateurs experts pour valider son adéquation au besoin, proposer des améliorations, évaluer et contribuer à l'acceptation du système technique.

5.1.2 Activité de démoulage de blocs pyrotechniques

L'objectif donné au lancement de l'étude sur ce sujet était d'évaluer l'apport potentiel de la cobotique au poste de démoulage des blocs, pour éviter des manutentions a priori pénibles. Pour répondre à cette demande, nous avons conduit une analyse de l'activité plus rapide que pour le sujet nettoyage des cuves, mais réalisant tout de même une étude des gammes et instructions de travail, et des entretiens/observations en situation, lors du démoulage de différents blocs.

Ce poste de travail a pour but de séparer les petits blocs de propergol solide de leurs outillages de coulée (socle, noyau, moule, etc.). Ces blocs, après démoulage, stockage et transport, sont tirés pour contrôler la validité de la composition. Les principales problématiques soulevées lors de la présentation du poste qui nous a été faite sont :

- la sécurité des opérateurs ;
- la durée des étapes d'emballage/conditionnement ;
- un manque d'efficacité du poste lors du changement de blocs à démouler (il y a plusieurs types de blocs et chacun doit être démoulé avec un outillage spécifique) ;
- la flexibilité du pilotage du vérin à distance.

Il est difficile de décrire exhaustivement ce poste étant donné le nombre de blocs et les différences entre leur démoulage. Nous allons ici tenter de résumer en donnant le principe du démoulage, qui dure environ 2h :

1. installer le bloc au poste ;
2. si le bloc présente un noyau : équiper le noyau et le démouler à distance à l'aide d'un vérin ;
3. déséquiper le noyau ;
4. équiper le moule et le démouler à distance à l'aide d'un vérin ;
5. déséquiper le moule ;
6. installer un collier autour du bloc sans moule, comportant toujours sa gaine conductrice ;
7. démouler le bloc de son socle à distance ;
8. contrôler visuellement et ébavurer le bloc ;
9. conditionner le bloc ;
10. nettoyer les différents éléments à l'acétone avant de les ranger.

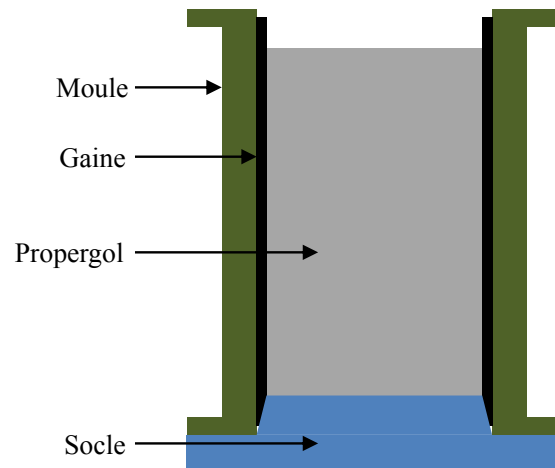


Figure 73 : Schéma des éléments constitutifs des petits blocs

Ainsi, les principaux types de tâche sont :

- le transport de bloc ou d'interfaces de démoulage ;
- le vissage/dévissage ;
- la mise/enlèvement de broches ;
- le pilotage de vérin depuis le poste de commande ;
- les contrôles visuels, nettoyages et conditionnements.

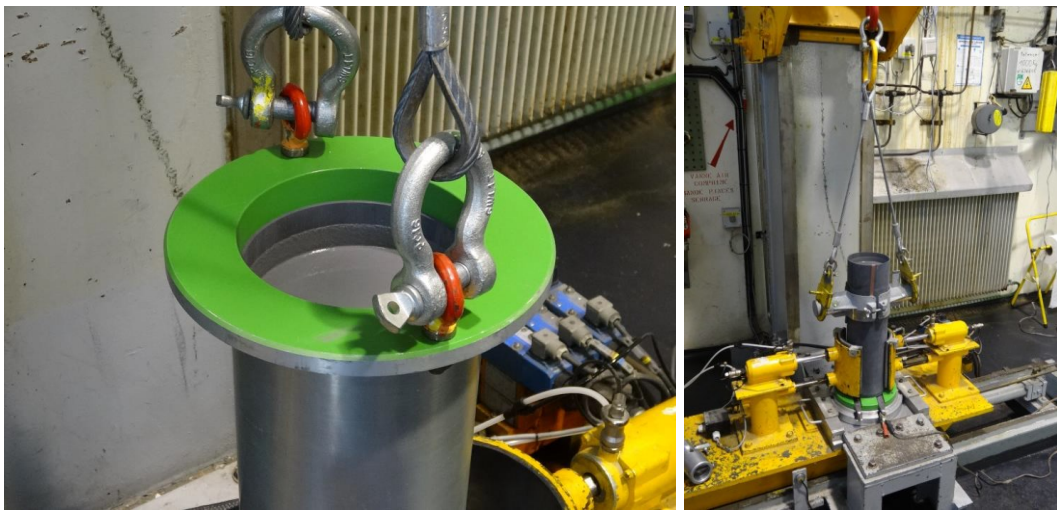


Figure 74 : Photographie de l'étape de démoulage des petits blocs

Lors du démoulage, les opérateurs régulent énormément de variabilités. Cette régulation fait appel à leur expertise et à leur expérience, mais ils sollicitent parfois leur supérieur hiérarchique s'ils n'ont pas de solution (toutes les situations de travail ne peuvent être décrites dans les gammes). Nous avons par exemple recueilli les anomalies constatées lors des contrôles, les différences suivant la texture du propergol, et les cas particuliers fréquents à ce poste.

Finalement, l'étude a proposé, plutôt que l'introduction d'un robot, un chantier d'amélioration du poste (rangements, organisation, etc.) sans grande transformation, comme une aide à la mise en position du bloc, le rangement d'outillages, ou le stockage des blocs par exemple. Pour les maintenances, étant données les cadences et variations d'un type de bloc à l'autre, un moyen plus simple qu'un robot pourrait répondre au besoin. Nous avons par exemple pensé à un chariot spécifique à hauteur réglable, ou à un moyen de manutention simple.

La conclusion de l'étude étant très peu en faveur de l'introduction d'un robot, nous n'avons pas suivi la suite du projet de démoulage des blocs. Le volume de travail fourni a été de l'ordre de 10 jours en binôme. L'analyse de ce poste a été utile puisqu'elle est un bon exemple du caractère non systématique de mise en place d'un système cobotique. Ce bref projet a montré que notre approche permet d'arriver à ces conclusions.

5.1.3 Activité de manutention d'armatures

Sur ce projet, un fournisseur a été consulté avant notre intervention pour trouver une solution à la manutention de pièces appelées les « armatures », structures d'une quinzaine de kilogrammes, d'environ 1 m de diamètre (le diamètre varie d'une pièce à l'autre), pour un poste qui n'existe pas actuellement.

L'équipe travaillant sur le sujet à Ariane Group a émis des doutes sur la proposition, qui prévoyait d'utiliser le pont avec un palan spécifique réglable, équipé de ventouses. Les parties prenantes ont fait l'hypothèse qu'il était possible de trouver une solution plus efficace, sachant que le pont serait également utilisé pour la manutention d'autres pièces avec un autre palan. Elles ont alors sollicité le binôme cognitif/roboticien pour évaluer les possibilités offertes par la cobotique pour cette application.

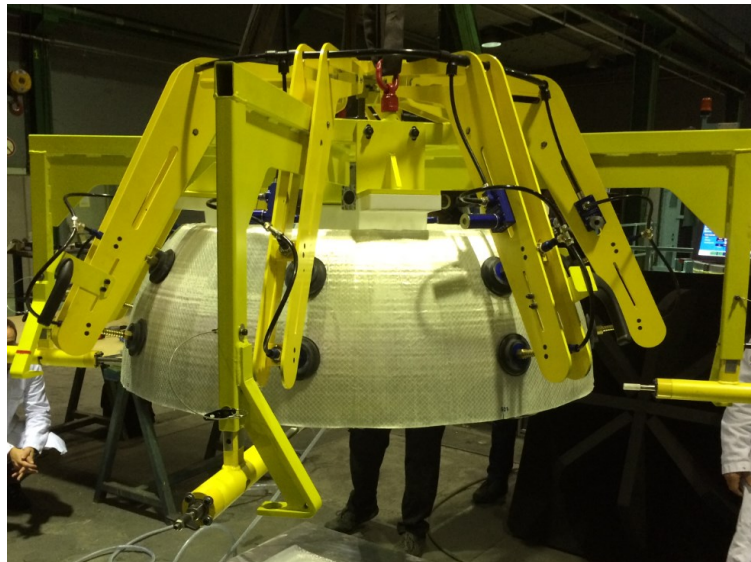


Figure 75 : Photographie du palan de manutention portant l'armature

Le projet étant déjà lancé, en l'absence d'activité actuelle observable et compte tenu des contraintes temporelles fortes (nous étions déjà en fin de thèse), nous avons réalisé une étude plus brève encore que celle décrite dans la section précédente pour le démoulage des blocs de contrôle. Le sujet nous a été présenté en réunion, nous avons demandé et reçu les différents documents actuels relatifs au futur poste (macro gammes, vidéo réalisée par un fournisseur, plan d'implantation, etc.) très rapidement, et visité quelques installations de références d'activités pour des pièces de dimensions et de matière différentes. Le volume de travail fourni sur ce poste a été de l'ordre de 3 jours en binôme. Nous avons présenté nos conclusions sur le besoin (prise en compte de toutes les phases de manutention dont la mise et la sortie des caisses par exemple) et des solutions potentielles (moyens de manutention intermédiaires entre le robot et le manipulateur simple) sous la forme d'une présentation orale assistée par un support vidéo-projeté. Nous avons également, par l'intermédiaire du réseau cobotique Safran, organisé une visite sur un site industriel présentant un moyen de manutention envisagé pour le poste. Le projet sera poursuivi après la rédaction de ce manuscrit.

5.1.4 Communication en entreprise

L'approche cobotique a été suivie par des groupes de travail à Safran Group et Ariane Group désignés « Copil¹⁰³ Cobotique ». Nous avons participé à l'animation de ces groupes en présentant l'avancée de nos réalisations et en faisant vivre un outil informatique de partage : le réseau collaboratif d'entreprise sur la cobotique. Cet outil dispose des comptes rendus de réunion, de documentation pour expliquer les possibilités de la cobotique, de bases de données de matériel pour la collaboration homme-robot, et d'un « newsfeed » permettant une veille technologique et un échange de bonnes pratiques. Nous avons par ailleurs participé aux groupes de travail sur les sujets de l'ergonomie et de la robotique à Safran Group et Ariane Group.

Nous avons présenté les travaux lors de deux événements majeurs internes : la Conférence de Recherche du Bouchet, journée durant laquelle dix présentations concernant les dernières avancées dans le domaine de la pyrotechnie sont présentées (mars 2017) ; et une Conférence du Savoir, présentation mensuelle d'un sujet stratégique pour Ariane Group (mai 2017).

Enfin, nous avons, lors de nombreuses visites de sites industriels au sein d'Ariane Group, Safran Group et au sein d'autres sociétés (cf. p. 159), appris de la découverte d'une grande variété d'installations et d'échanges avec de nombreuses équipes.

Ces visites et ces rencontres ont largement participé à la mise au point et à la conduite de l'approche méthodologique.

5.2 Bilan sur l'approche méthodologique

5.2.1 Vers l'industrialisation du nettoyage des cuves

Au Chapitre 4, le projet nettoyage des cuves a été décrit jusqu'à la fin de la simulation avec le prototype. Suite à cela, nous sommes actuellement en phase de rédaction des spécifications techniques. Nous nous appuyons pour cela sur des experts compétents en portage de robots (l'entreprise Lucas France¹⁰⁴), téléopération (le CEA Tech), et implantation industrielle¹⁰⁵ (par le service investissements). Leur expertise, confrontée à celle de l'équipe projet, à l'analyse du besoin et aux résultats des simulations, permettra de rédiger un cahier des charges technique. Ce document sera diffusé à une sélection de fournisseur pour obtenir en retour une enveloppe budgétaire qui permettra aux décideurs d'accorder ou non un financement pour l'installation finale.

Le principe général de l'industrialisation, suivant la conduite de projet PROMPT, consiste à réaliser un prototype industriel¹⁰⁶, à mener les étapes de chantier, de démarrage et de mise au point, c'est-à-dire :

- finaliser le cahier des charges et consulter les fournisseurs susceptibles d'y répondre ;
- vérifier que la réalisation satisfait aux exigences, en particulier du point de vue de l'intégration des utilisateurs finaux et de la robotique, sans pour autant oublier la tâche et l'environnement ;

¹⁰³ Abréviation de comité de pilotage.

¹⁰⁴ Entreprise girondine constructrice d'axes robotiques et distributeurs des robots industriels de la marque Comau.

¹⁰⁵ Pour l'implantation industrielle, l'atelier de Kourou a été modélisé sur un logiciel de CAO et un fournisseur a accepté d'y intégrer le robot et son support. Ainsi, nous pourront emmener les parties prenantes du projet dans la salle de réalité virtuelle d'Ariane Group pour évaluer cette implantation.

¹⁰⁶ Le prototype déjà présenté ne correspond pas à ce qui est désigné « prototype industriel » dans la conduite PROMPT. Le prototype industriel est fonctionnel, il permet par exemple une démonstration de fonctionnement du système final dans les locaux du fournisseur.

- qualifier et former les opérateurs pour répondre au maximum de situations de travail sur des préséries ;
- mettre en service, analyser les situations de travail finalisées, procéder au retour d'expérience et à d'éventuels ajustements.

Pour l'industrialisation, la question de l'expérience, des savoirs et savoir-faire des acteurs en production (opérateurs, chefs d'atelier, maintenance, etc.) pour l'utilisation du dispositif technique doit avoir été anticipée, notamment lors des simulations. Nous avons par exemple fait tester le prototype de nettoyage des cuves aux responsables de production, à des opérateurs de maintenance, au méthodiste, et au service industrialisation. Nous avons à cette occasion pu intégrer leur retour sur l'intégration du dispositif dans l'organisation.

Garrigou et al. (2001) ont souligné que le cahier des charges ne peut être considéré comme un simple document de formalisation des besoins, ou de consultation de prix. Il est illusoire, voire dangereux de trop le figer. Il convient mieux de le considérer comme un outil de communication entre le client et les fournisseurs, qui doivent pouvoir le faire évoluer tout au long du projet pour qu'il réponde plus précisément au besoin et contraintes.

En réalité, la conception ne s'arrête pas lors de la rédaction du cahier des charges technique, ni dès que l'installation du dispositif est terminée. La conception se poursuit lors des formations, avec divers réglages et ajustements, et lors de l'utilisation, qui verra les opérateurs monter en expertise et réguler différemment au sein du système cobotique. Le robot est alors éventuellement reprogrammé, réglé, amélioré. Suite à la mise en service, la dernière étape est le retour d'expérience, lors duquel un retour critique sur le projet et sur le système final sont déterminants pour capitaliser sur l'expérience acquise.

Toutes ces étapes, jusqu'à la mise en service et le retour d'expérience, restent à mener pour le nettoyage de cuve, pour lequel les financements restent à débloquer au moment de la rédaction de ce manuscrit.

5.2.2 Retour d'expérience

Les différents projets que nous avons conduits nous ont permis d'évaluer l'apport de la co-construction de l'équipe. Cette équipe puise dans la robotique pour connaître et évaluer les solutions techniques, la cognitive pour la formalisation des connaissances et l'analyse des fonctions cognitives homme-robot, et l'ergonomie pour l'analyse de l'activité et la conception centrée opérateur. Deux à deux, ces disciplines rendent possible l'étude :

- de la cognition de l'opérateur avec la cognitive et l'ergonomie ;
- de l'intelligence artificielle et la modélisation avec la cognitive et la robotique ;
- de la santé des opérateurs dans l'interaction avec l'ergonomie et la robotique.

La collaboration entre homme et robot dans l'industrie a été étudiée par la réunion de ces disciplines, associée à l'ingénierie des systèmes pour la prise en compte de la performance globale, la maturité du système et la démarche de conception. Cette vision pour la cobotique est illustrée par le schéma de la Figure 76.

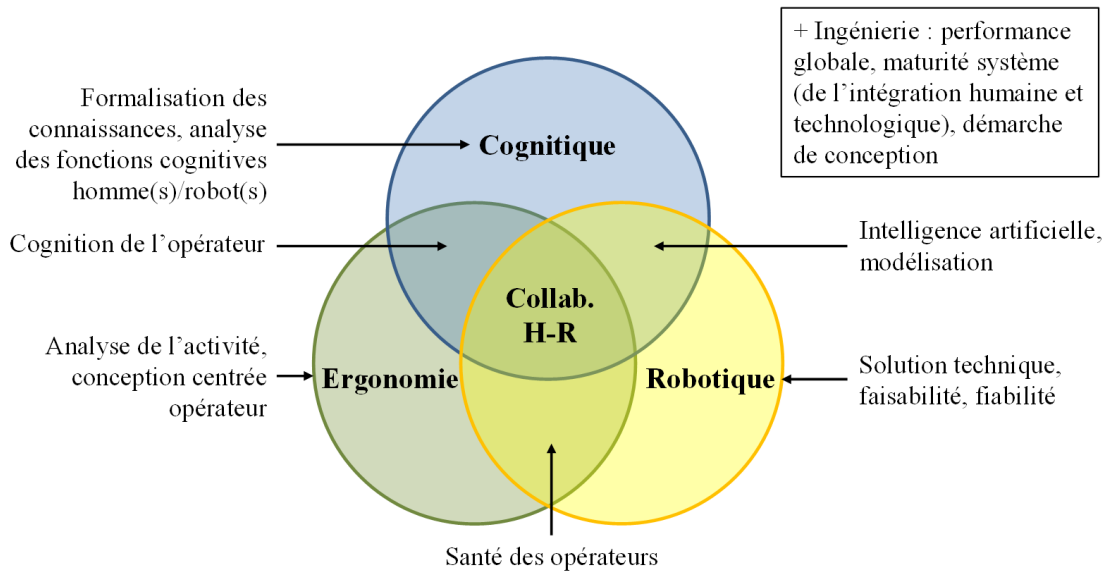


Figure 76 : Cognitique, robotique et ergonomie pour l'ingénierie des systèmes cobotiques

L'équipe pluridisciplinaire évoquée au premier chapitre est devenue interdisciplinaire. Ses membres ont acquis des connaissances dans d'autres disciplines, et ont ensemble conjointement développé des connaissances communes, interdisciplinaires, sur la collaboration homme-robot.

L'expérience a montré la pertinence et la richesse de l'analyse en profondeur de l'activité réelle des opérateurs dans des situations de référence. L'analyse de l'activité nous paraît indispensable pour mener à bien un projet en cobotique. La conception du système cobotique a ensuite été réalisée à travers des simulations, c'est-à-dire en itérant sur la préparation d'hypothèses et de scénarios, la mise au point de supports, la simulation de l'activité future avec les opérateurs, l'évaluation et l'amélioration de la conception. La conduite des simulations nécessite ces compétences pour prendre en compte toutes les dimensions du système.

Le premier paramètre clé de la simulation est sa représentativité, qui doit être adaptée à l'étape du projet. En effet, une simulation trop détaillée est chronophage et difficile à modifier, alors qu'une simulation trop superficielle ne permet pas de valider les hypothèses, les conditions de la situation simulée sont trop éloignées des conditions réelles. Dans les projets impliquant un robot, nous avons constaté que les simulations sont souvent tardives dans le projet et très détaillées. Cela limite leur intérêt pour la conception, puisque d'éventuelles modifications sont coûteuses à simuler, et donc rarement évaluées. De plus, les opérateurs sont rarement impliqués dans la démarche.

La seconde difficulté fréquemment rencontrée dans l'industrie est le faible accès aux opérateurs, mobilisés par les demandes de la production. L'intégration des opérateurs au projet doit être cadrée dès le départ afin d'avoir l'assurance de pouvoir se baser sur leur expertise. Les opérateurs pourront par la même occasion s'assurer que le système technique répond à leur besoin pour la tâche.

Nous avons constaté, par exemple avec l'étude du dispositif haptique (cf. 4.4), l'importance de connaître les possibilités technologiques en lien avec la cobotique, et leur facilité d'industrialisation.

L'approche méthodologique développée dans cette thèse n'a pas vraiment pu être mise en œuvre pour des systèmes de colocalisation, comanipulation, et encore moins pour l'exomanipulation¹⁰⁷. Elle

¹⁰⁷ Pour rappel, l'exomanipulation est considérée comme insuffisamment mature par Safran Group pour une application immédiate dans l'industrie.

semble tout de même compatible avec les différents types de systèmes cobotiques, comme nous avons pu commencer à le constater pour les postes de démoulage des blocs et de manutention des armatures. Les deux projets les plus aboutis concernent des systèmes de téléopération, mais rien n'est spécifique à ce type de système dans l'approche.

Pour le déploiement de l'approche, nous avons observé l'importance de communiquer et de fédérer les secteurs pour Ariane Group et plus largement les filiales pour Safran Group autour du sujet. À cet effet et pour partager les expériences, la constitution et la réunion de groupes de travail spécifiques a prouvé son efficacité tout au long de la thèse.

5.2.3 Limites et perspectives

L'approche méthodologique développée et appliquée dans cette thèse présente plusieurs limites qui feront sans doute l'objet de développements ultérieurs à Ariane Group et Safran Group.

Déjà, pour mener les projets industriels, le temps passé par le binôme cogniticien/roboticien n'était pas décompté du budget du projet. La compatibilité de l'analyse de l'activité et des simulations avec les finances des projets sera estimée dans de futurs projets.

De plus, les étapes d'industrialisation n'ont actuellement pas encore été menées. Il faudra à ce moment veiller au respect des recommandations concernant le robot et les opérateurs, à la formation des opérateurs, et à analyser l'activité finalisée pour éventuellement ajuster la solution.

Un outil a été proposé pour l'intégration de l'homme dans la conception : le HIRL. Cet indicateur doit être appliqué à d'autres projets pour prouver sa pertinence. Pour cela, il doit être utilisé pour différents projets de l'*Industrie du Futur Safran*¹⁰⁸.

Nous n'avons abordé que succinctement la prise en compte des normes et les contraintes de sécurité à prendre en compte dans l'analyse des risques. Elles sont d'autant plus importantes dans la conception de systèmes pour lesquels l'homme et le robot partagent l'espace de travail, ce qui n'est pas le cas du nettoyage des cuves et du retrait des voiles, les deux projets principaux conduits dans la thèse.

Par ailleurs, pour la recherche de solutions techniques, nous n'avons pas étudié les potentiels avantages des théories de conception et de créativité, comme le Concept-Knowledge¹⁰⁹ ou la méthode TRIZ¹¹⁰ par exemple.

L'approche et les modèles associés n'abordent pas non plus les systèmes au sein desquels plusieurs hommes et robots collaborent, à une échelle plus large. On peut imaginer que les développements de ce manuscrit 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.

Lors des échanges avec les stagiaires ingénieurs, nous avons constaté que la transmission de l'approche méthodologique est loin d'être triviale, et par conséquent qu'il est nécessaire de développer des outils pour accompagner les concepteurs de systèmes cobotiques. Dans les prochains travaux à mener, nous projetons de rédiger un guide simple et général, permettant d'avoir une compréhension de la cobotique et des possibilités qu'elle offre. Pour le compléter, des notes détaillées sur l'analyse de l'activité et les simulations pour la cobotique sont en cours de rédaction. Étant données les variabilités

¹⁰⁸ Regroupement de projets innovants relevant des thématiques de l'Usine 4.0 au sein de Safran Group.

¹⁰⁹ Théorie de conception s'appuyant sur les notions de « concept » et de « connaissances ». Le « concept » n'a pas de statut logique, il s'agit des propriétés désirées par les concepteurs. Les « connaissances » sont les vérités établies par le concepteur.

¹¹⁰ La théorie de résolution des problèmes inventifs (TRIZ) est une méthode de créativité, d'innovation.

entre les projets (contraintes temporelles, besoins, finances, etc.) et entre les concepteurs (propension à travailler avec les opérateurs, domaine d'expertise, etc.), les outils et la méthodologie se doivent d'être flexibles, adaptables, et compréhensibles par des novices.

La section suivante aborde un développement réalisé en réponse à un besoin de nos interlocuteurs en entreprise.

5.2.4 Développement d'un outil pour la conception

Lors de nos échanges en entreprise, un besoin souvent formulé par les concepteurs était de disposer d'un outil d'aide à la décision (ou système expert) pour faciliter le choix entre un « robot classique », un cobot, un simple manipulateur, ou d'autres dispositifs, à partir d'un certain nombre de critères. Nous présenterons d'abord la réponse que nous avons apportée et les perspectives qu'elle offre.

Un système expert qui permettrait, à partir du besoin, d'orienter le concepteur vers un dispositif plutôt qu'un autre a l'avantage de produire une solution claire et immédiate¹¹¹. Nous avons cependant relevé plusieurs points de vigilance vis-à-vis de l'utilisation d'un tel outil dans la conception.

Premièrement, l'utilisation d'un système expert peut pousser à se passer de l'analyse de l'activité, élément de base, irremplaçable de la méthodologie, par une simple réponse aux critères requis pour renseigner l'outil. Aussi, les paramètres à prendre en compte sont d'une variété et d'une quantité quasi-infinie, et leur importance dépend du point de vue (opérateur, encadrement, méthode, sécurité, concepteur, etc.). De ce fait, il est difficile d'imaginer la forme que prendrait un tel outil : un questionnaire ? Un arbre de décision ? Une grille de cotation ? Aucune solution envisagée ne faisait l'unanimité durant les discussions, et l'outil résultant serait vraisemblablement une « usine à gaz », dont les choix seraient difficiles à interpréter pour le concepteur. Le sujet qui en découle immédiatement est la responsabilité en cas de réponse inadaptée de l'outil : relève-t-elle de l'utilisateur ou du concepteur du logiciel ? De plus, ce type d'outil aurait pour sûr besoin d'une maintenance sur son contenu, étant donné le foisonnement de nouvelles technologies qui rendent possibles de nouvelles opérations années après années. Enfin, ce qui rend un tel système expert incompatible de l'approche cobotique est qu'il est motivé par le choix entre robot, cobot et manipulateur, c'est-à-dire le choix de matériel, de dispositifs techniques. Or, la cobotique ne s'intéresse pas simplement aux dispositifs techniques mais également aux rôles de l'homme et du robot pour réaliser la tâche.

En revanche, le besoin d'un outil qui soutienne les concepteurs pour prendre connaissance du panel des solutions possibles pour un poste nous semble pertinent, tant ces solutions leur sont parfois inconnues. Pour cela, nous avons tenté de classer les différents systèmes de travail. Nous nous sommes d'abord basés sur les travaux de classification des robots de Coiffet (1996), puisqu'il prend en compte à la fois la partie robotique et dans une moindre mesure le rôle de l'homme. Il choisit quatre critères : l'action de l'homme, le type de système de commande, la mobilité du robot, et le besoin de compréhension de l'environnement.

On a ainsi 72 combinaisons « théoriques » de systèmes robotiques (cf. Tableau 33), réduites à 21 et réparties entre système mobile et fixe (cf. Tableau 34).

¹¹¹ Par exemple, Rossi et al. (2013) ont cherché à établir de façon méthodique une liste de critères adaptés aux *Intelligent Assist Devices*, moyens de manutention évolués.

<i>Entités</i>	<i>H</i>	<i>Homme</i>	<i>C</i>	<i>Système de commande</i>	<i>R</i>	<i>Robot</i>	<i>E</i>	<i>Environnement</i>
<i>Caractéristiques principales vis-à-vis de la tâche</i>	1	Action permanente	1	Boucle ouverte	1	À poste fixe	1	Entièrement connu
	2	Action intermittente	2	Régulation	2	Mobile	2	Partiellement connu
	3	Pas d'action	3	Régulation et réflexe			3	Mal connu
			4	Régulation, réflexe et décision				
<i>Nb. de cas théoriques</i>	3		4		2		3	Total : 72

Tableau 33 : Tableau de classification des robots selon Coiffet (1996)

<i>Robots fixes</i>		<i>Robots mobiles</i>	
<i>C1H1</i>	Manipulateur ou télémanipulateur manuel	<i>C1H1</i>	Véhicule téléopéré en boucle ouverte
<i>C1H3E1</i>	Manipulateur séquentiel	<i>C1H3E1</i>	Robot mobile type filoguidé
<i>C2H1</i>	Télémanipulateur asservi manuel	<i>C2H1</i>	Véhicule téléopéré avec asservissements
<i>C2H3E1</i>	Robot playback	<i>C2H3E1</i>	Robot mobile à commande asservie sur trajectoire connue
<i>C3H1</i>	Télémanipulateur asservi avec sécurités et réactivité	<i>C3H1</i>	Véhicule à téléopération asservie avec sécurités et réactivité
<i>C3H3E1</i>	Robot playback avec sécurités et réactivité	<i>C3H3E1</i> <i>C3H3E2</i>	Robot mobile à évitement automatique d'obstacle avec ralliement d'objectif
<i>C4H1</i> <i>C4H2</i>	Téléopérateur assisté par ordinateur/contrôle supervisé	<i>C3H3E3</i>	Comme 6 mais sans ralliement d'objectif
<i>C4H3E1</i>	Robot avec générateur de plan	<i>C4H1</i> <i>C4H2</i>	Téléopération de véhicule à contrôle supervisé ou à commande hybride
<i>C4H3E2</i>	Robot avec générateur de plan et adaptatif	<i>C4H3E1</i>	Robot mobile autonome à générateur de plan
<i>C4H3E3</i>	Robot autonome parfait	<i>C4H3E2</i>	Comme en 9 mais adaptatif
		<i>C4H3E3</i>	Robot mobile autonome parfait

Tableau 34 : Typologie des robots fixes et mobiles selon Coiffet (1996)

Pour notre application en cobotique, nous avons choisi de reprendre le besoin de mobilité du robot, qui a un impact fort sur la forme du système, le besoin de compréhension de l'environnement qui rejoint l'autonomie du robot¹¹², et de détailler le rôle de l'homme dans le système, ne le résumant pas simplement à l'action. Le type de système de commande n'est pas à la portée d'un novice en

¹¹² L'autonomie est discutée dans le Chapitre 2 (cf. 2.3.1).

robotique, et il nous semble découler de la complexité de la tâche, c'est-à-dire du besoin de compréhension de l'environnement et du rôle de l'homme. Il n'a donc pas été conservé dans notre proposition. Nous avons par ailleurs ajouté la notion de colocalisation, qui a de grandes conséquences sur les éventuelles mesures de sécurités à mettre en place d'après la norme ISO 10218-2 (2011).

Pour détailler le rôle de l'homme, nous avons tenté d'intégrer le modèle de l'opérateur présenté précédemment (cf. 2.1) de façon la plus accessible possible pour un concepteur n'ayant aucune notion de psychologie cognitive ou d'ergonomie. Ainsi, la simplification la plus compréhensible et efficace que nous avons rencontrée est le cycle, décrit par l'IFSTTAR (Bellet, Mayenobe, & Bornard, 2010), de perception-cognition-action (cf. Figure 77).

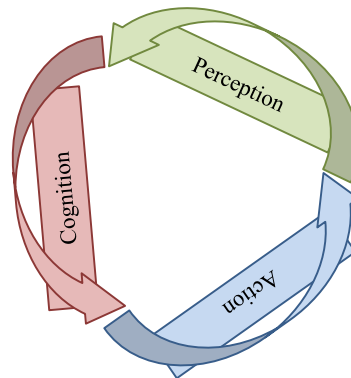


Figure 77 : Schéma très simple de la cognition de l'IFSTTAR (Bornard, 2012)

Pour simplifier encore ce modèle, nous remplacerons le terme cognition par « décision/planification ». Nous avons pleinement conscience du caractère discutable et considérablement réducteur de cette simplification de la cognition. L'objet ici est simplement de proposer une description des types de systèmes cobotiques de façon la plus accessible possible pour inciter les concepteurs novices à prendre en compte l'homme dans le système. Les critères retenus pour trier les systèmes cobotiques pour la conception sont décrits dans le Tableau 35.

<i>Dans le futur système, vis-à-vis de la tâche, ...</i>		
<i>l'opérateur sera expert en...</i>	perception	toujours/parfois/jamais
	décision/planification	toujours/parfois/jamais
	action	toujours/parfois/jamais
<i>le robot aura besoin de...</i>	mobilité	fixe/mobile
	compréhension de l'environnement	inutile/partielle/poussée
	partage de l'espace de travail avec l'homme	toujours/parfois/seulement pour les cas transitoires et dégradés

Tableau 35 : Critères de classification retenus pour les systèmes de travail

De nombreux systèmes et types de systèmes ont ensuite été catégorisés suivant ces critères. Nous avons regroupé ces systèmes au maximum, pour arriver à une liste de 16 systèmes de travail. Le tableau de systèmes peut être filtré par les critères du Tableau 35, on obtient ainsi la liste des systèmes qui répondent aux critères. Le résultat de l'outil est plus descriptif que prescriptif, ce sont les réponses aux critères et les filtres qui éliminent les systèmes ne correspondant pas. Ainsi, en justifiant chaque filtre employé, on peut réduire les possibilités de solutions. Le choix final reste tout de même à valider, par exemple par le groupe de travail après avoir consulté des fournisseurs.

Cet outil a été implémenté sur le réseau d'entreprise du groupe Safran, afin d'être évalué par différents experts en robotique, ergonomes, concepteurs, chefs d'atelier, etc. Nous n'avons, au moment de la rédaction de cette thèse, pas encore récolté les retours des utilisateurs potentiels. La liste de systèmes et leur classification sont conçues de façon empirique et doivent être améliorées puis validées.

Pour tout de même répondre au besoin des roboticiens concernant le matériel à utiliser pour collaborer avec un robot, nous avons mis en place des bases de données de robots collaboratifs, d'effecteurs, capteurs et autres moyens dédiés à l'interaction homme-robot (cf. Figure 78). Elles sont plus largement décrites dans la thèse de David Bitonneau.

Miniature	Reference ▼	Fournisseur / Supplier	Cobot type	Payload (kg)	Portée / Reach (mm)	Max speed (mm/s)	Repeatability (mm)	Prix / Price (k€) ↓ ▼
	LBR iiwa 14 R820	KUKA	Bras robotique / Robotic Arm	14	820		0.15	50
	YuMi	ABB	Bi-bras / Dual-Arm	0.5	500	1.500	0.02	40
	Baxter	Rethink Robotics	Bi-bras / Dual-Arm	2.2	1.210	1.000		25

Figure 78 : Capture d'écran d'un extrait de la base de données des robots collaboratifs sur le réseau intranet Safran Group

5.3 L'usine cobotique du futur

5.3.1 La cobotique au-delà d'Ariane Group

Pour la cobotique comme pour nombre d'autres domaines, Safran Group profite de son réseau de filiales pour partager les expériences, à travers des groupes de travail thématiques. Il en existe un sur la robotique, un sur l'ergonomie, et même un dédié à la cobotique¹¹³. Nous avons grâce à cela pu partager avec Safran Aircraft Engines qui dispose d'un Atelier d'Innovation Industrielle en charge de développer les nouvelles technologies de fabrication pour la société, comme la cobotique, la robotique, l'impression 3D ou la réalité virtuelle. Il nous a semblé que leur fonctionnement était extrêmement efficace pour développer de nouveaux projets, puisqu'ils disposent de matériel et de ressources compétentes pour l'utiliser, avec une volonté d'être le plus agile possible, avec la possibilité de démontrer l'efficacité des technologies en interne.

Safran Group n'est pas le seul industriel à être positionné sur la cobotique. Par exemple, Adolfo Suarez, expert robotique chez Airbus Group, indique que « ces nouveaux robots amènent des bénéfices et des opportunités énormes pour la France », qu'« il faut foncer sur ce nouveau type de robots pour faire la différence avec les autres » (Suarez Roos, 2016).

La liste d'industriels qui se lancent sur cette voie est longue. Nous prendrons comme dernier exemple l'équipementier automobile Valeo, qui selon le *Human Richness Director* Fabien Siguiier, investit massivement dans des cobots. Ce sont les ressources dont ils disposent pour les déployer dans les

¹¹³ Au sein de Safran Group, la cobotique est employée dans son acception développée dans cette thèse : la collaboration homme-robot.

usines qui limitent la quantité de nouvelles installations (Siguier, 2017). Malgré cela, ils sont installés pour gagner de l'espace au sol et faciliter la reprogrammation, les situations réellement collaboratives demeurent extrêmement rares.

Ce foisonnement de démarches montre l'intérêt des industriels envers la cobotique, et donc l'intérêt d'étudier une approche méthodologique pour la conception. Les applications que l'on retrouve dans les usines sont pour l'heure quasi-exclusivement de la simple colocalisation, ou coprésence, sans réelle collaboration entre homme et robot. Il nous semble cependant, et cela a été développé dans ce manuscrit, que cette collaboration que l'on retrouve dans les systèmes cobotiques est une perspective à court terme pour l'Industrie du Futur.

5.3.2 Le système cobotique du futur

Du point de vue robotique, l'histoire du contrôle est révélatrice de l'évolution des enjeux techniques et technologiques, démarrant par la boucle ouverte, passant par la boucle fermée et le contrôle linéaire, par le contrôle non linéaire et adaptatif, et plus récemment basés sur des règles mélangeant logique nette et floue (*crisp and fuzzy logic*), réseaux de neurones, et algorithmes génétiques (Sheridan, 1999). Cette évolution va en quelque sorte du plus déterminé au plus incertain, pour mieux gérer l'imprévu, la complexité. Ainsi, avec l'arrivée dans l'industrie de l'intelligence artificielle, souvent désormais appelée intelligence augmentée puisqu'elle est liée à celle de l'homme, un des enjeux des prochaines années est la certification/validation d'algorithmes dont le fonctionnement est incompris des concepteurs.

En outre, dans les prochaines années, les robots vont être de plus en plus connectés au reste de l'usine, devenant des dispositifs cyber-physiques¹¹⁴. Ils seront donc sujets aux cyberattaques, ce qui positionnera la cyber-sécurité comme un enjeu de taille pour le système cobotique du futur.

Sur les installations industrielles, les matériels et logiciels des fournisseurs sont actuellement très spécifiques et peu ouverts. La tendance est actuellement à la standardisation des moyens de communication, des logiciels, des interfaces matérielles, etc., sans quoi il sera impossible de connecter différents dispositifs techniques dans l'Industrie du Futur.

La collaboration avec l'homme permet aux robots de collecter des données, par exemple pour assurer la traçabilité de la production. Ces données sont susceptibles d'être liées aux opérateurs, d'être personnelles. Alors, une hausse de la fatigue au travail, ou encore de déviations par rapport aux gammes pourront par exemple être détectées par le robot. La gestion de ces données doit donc être bien définie.

Selon Dekker et Woods (2002), pour des cas complexes, dynamiques, non déterministes, l'homme continuera à être impliqué dans les opérations robotisées. Endsley (2015) va dans le même sens, puisque selon l'auteur, l'homme sera amené à interagir de plus en plus avec des robots dans un futur proche, notamment parce qu'ils vont de plus en plus être confrontés à des situations imprévues. Les perspectives imminentes de la collaboration homme-robot sont donc à l'hybridation, au *teaming*. Le système cobotique est alors une augmentation de l'homme par la technologie, un système cobotique est ce qui est appelé depuis quelques années un « homme augmenté » (Claverie, 2014; Claverie, 2016).

Bannat et al. (2011) envisagent un déclin de l'automatisation conventionnelle, c'est-à-dire de la « robotique classique », en raison du besoin à venir de gérer la complexité. Pour répondre à ce besoin

¹¹⁴ Un système cyber-physique est un système intelligent dans lequel les systèmes physique et computationnel sont intégrés pour contrôler et capter les variations de l'environnement réel (Khalid, Kirisci, Ghairi, Klaus-Dieter, & Pannek, 2016).

en complexité, ils introduisent la notion d'« automatisation cognitive¹¹⁵ » comme automatisation flexible, adaptable, auto-organisée, que l'on pourrait aussi traduire « autonomisation », voie dans laquelle la cobotique s'inscrit tout à fait.

Les capacités croissantes d'« intelligence » et d'adaptabilité des machines rendent la frontière entre fonctions humaines et fonction de machine de moins en moins claire (Sheridan, 1999). La notion de symbiose homme-technologie, et donc homme-robot, introduite dès les années soixante (Licklider, 1960) est de plus en plus évoquée. Au départ, la relation entre homme et technologie était peut-être utilitaire, mais selon Brangier et al. (2010), elle devient de plus en plus une relation de dépendance, créant des « liens intimes » et une « influence mutuelle ». En effet, les robots réalisent des tâches ou des fonctions avec ou pour l'homme, l'homme et le robot co-évoluent¹¹⁶ dans le temps, et l'homme est même technologiquement puisqu'il construit en partie son évolution sur sa relation avec la technologie.

Nous verrons dans une prochaine section (cf. 5.3.4) la probable nécessité d'inculquer au robot des propriétés que l'on réserve actuellement à l'homme, comme l'émotion pour résoudre « moralement » des dilemmes. Les dimensions affectives, émotives de la robotique industrielle peuvent être tout aussi importantes pour favoriser la collaboration poussée, par compréhension mutuelle, *human-like collaboration*, déjà envisagée par Boy (2002) ou Hoc (1998). Cela pourrait permettre au robot non seulement de comprendre l'ordre, mais aussi et surtout de comprendre l'intention.

Alors que la question est souvent « quelle éthique inculquer à la machine », Whitby (2008) pousse la réflexion encore plus loin, étudiant la question de ce que l'on pourrait appeler la « maltraitance des robots », c'est-à-dire la façon dont les humains traitent ces agents artificiels. Un robot éthique pourra logiquement s'apercevoir qu'il est maltraité par l'homme, et suivant la même idée, la confiance qu'il doit accorder en l'homme. Cette question mérite à mon sens d'être posée en même temps que la question de l'éthique du robot.

Dans la réalisation de tâches, l'homme reste pour le moment indispensable à minima pour communiquer des objectifs à la machine. Il est également inégalable pour s'adapter à de nouvelles situations mettant en jeu de nombreuses dimensions. Si nous comprenons clairement la façon dont l'homme procède à ces deux fonctions (se fixer des objectifs et s'adapter), alors nous pourrions programmer une machine pour les remplir (Sheridan, 1999). De cette façon, une machine pourra potentiellement en concevoir une nouvelle...

Dans la section suivante, le système cobotique est replacé dans le contexte qui nous intéresse particulièrement dans cette thèse : l'Industrie du Futur.

5.3.3 Les systèmes cobotiques dans l'Industrie du Futur

L'Industrie du Futur est souvent décrite comme un réseau de technologies et d'hommes connectés notamment grâce à l'internet des objets, *Internet of Things*, ou encore IoT (Wollschlaeger, Sauter, & Jasperneite, 2017). Ainsi, un écosystème d'hommes et de technologie est envisagé pour mieux produire. Les robots interagissent alors avec les opérateurs dans des systèmes cobotiques, et avec les autres technologies de l'information et de la communication. Cela s'inscrit pleinement dans la vision d'Industrie du Futur pervasive (Claverie & Fouillat, 2010). Cette vision de l'usine considère que la technologie sera omniprésente et connectée, revêtue par les opérateurs (lunettes de réalité augmentée, montre ou autre dispositif connecté, exosquelette, etc.) ou intégrée dans leur environnement de travail.

Les thèmes inter- voire transdisciplinaires de l'Industrie du Futur sont notamment le big data, l'intelligence augmentée, la cobotique, la cyber sécurité, l'IoT et l'impression 3D. Pour monter en

¹¹⁵ En anglais *cognitive automation*.

¹¹⁶ Cf. 2.4.2 : auto-organisation du système cobotique.

maturité sur ces sujets émergents, la question des compétences des industriels est déterminante. Faut-il plus encore se rapprocher de laboratoires de recherche ? Acquérir des start-up spécialisées ? Constituer des pôles R&D internes ? Développer l'emploi spécialisé ? Développer la formation interne ? Confier aux intégrateurs et autres sous-traitants toute l'expertise et se reposer sur eux ?

Nous n'avons pour l'heure pas la réponse à ces interrogations, mais il nous semble qu'il est indispensable pour les industriels d'avoir une organisation agile et flexible pour s'adapter rapidement aux évolutions et de maîtriser un minimum ces nouvelles technologies. En effet, les expertises métier des usines résident historiquement dans l'expertise des opérateurs. Or, la « robotisation classique » transfère ces compétences vers l'intégrateur de robot, qui absorbe l'expertise et livre un robot qui est souvent une boîte noire.

Dans l'usine, on assiste alors à la disparition des compétences « métier » du fait de la robotisation, et à la dépendance des sous-traitants qui détiennent la compétence. L'approche cobotique, avec des compétences internes à la fois sur les technologies, l'homme et les procédés mis en œuvre, permet au contraire une transformation de l'expertise des opérateurs, et une montée en compétences de l'industriel. Cela a été montré au travers des projets menés à Ariane Group par le binôme cogniticien/roboticien. Il faut tout de même être vigilant à la transformation de l'activité humaine, qui peut amener des tâches plus exigeantes du point de vue cognitif, un stress nouveau, des habitudes, un rythme de vie (organisation, rotation au poste, mobilité) foncièrement différents (Spath, Braun, & Bauer, 2009).

Les brèves discussions précédentes amorcent la question des modèles productifs (Boyer & Freyssenet, 2000) pour l'Industrie du Futur, en particulier vis-à-vis de l'utilisation de robots. Ces aspects économiques n'ont pas fait l'objet de développements dans cette thèse mais nous semblent déterminants pour la réussite du projet « Industrie du Futur ».

Dans une perspective d'augmentation de l'homme au travail, les inégalités pourraient se creuser entre les continents, pays, régions, usines et opérateurs « cobotisés » et les autres, car il est évident que tous ne disposeront pas immédiatement d'un robot pour collaborer.

Par ailleurs, il y a deux façons radicalement différentes de considérer un robot industriel. La première est de voir le robot comme un assistant, un outil, voire un esclave technologique. Cette vision est communément acceptée et largement répandue dans nos sociétés occidentales dans lesquelles l'homme a une place à part, est le seul qui importe, le seul à être perçu comme individu. Il est alors difficile de former des équipes homme-robot, puisque le robot ne doit pas empiéter sur l'espace théoriquement réservé à l'homme. La deuxième voie est de considérer un robot soit comme un partenaire, un coéquipier avec lequel l'homme peut s'allier, soit comme élément d'une structure hybride homme-robot, l'homme et le robot se prolongeant l'un l'autre, dans une relation allant jusqu'à la symbiose. Cette alternative est peu répandue en occident, mais parfois culturelle ailleurs, comme au Japon qui, dans une tradition animiste ne distingue pas le naturel et l'artificiel. Les systèmes cobotiques peuvent alors être abordés plus aisément et de façon plus directe. Il est par ailleurs intéressant de constater que les deux visions du robot varient en fonction de la place de l'homme dans la société.

5.3.4 Éthique

La robotique industrielle est souvent crainte puisqu'elle « remplace le travail humain ». En robotique comme en cobotique, l'objectif est d'améliorer la performance globale. L'amélioration de la performance conduit, pour un volume de production donné, à réduire le nombre d'heures que l'homme passe à travailler, il serait malhonnête de le nier. Cette réduction de la charge de travail pour l'homme pose la question de la place de l'homme et du robot dans la société, et de la redistribution des richesses produites par le robot.

L'objectif souvent fixé en robotique est de répondre aux demandes de l'homme. Or, satisfaire nos besoins en tant qu'humains n'est souvent pas une fonction qu'un robot peut assurer. Par exemple, les hommes aiment travailler pour aider les autres (Sheridan, 1999). Le fait que les robots permettent la conservation d'un travail humain est alors déterminant pour notre société, bien que cela semble paradoxal. La cobotique a là encore un rôle à jouer.

Alors que la robotique classique vise explicitement à remplacer les opérateurs par des machines, l'approche en cobotique vise à optimiser l'équipe homme-robot pour réaliser des tâches. Ainsi, les dimensions humaines sont mieux prises en compte, remplaçant les opérateurs et leur rôle dans les préoccupations de l'Industrie du Futur.

L'éthique en robotique est souvent évoquée sous l'angle des trois lois d'Asimov (1942), du fait de leur médiatisation. La population nourrit donc des attentes à propos de ces lois, que Murphy et Woods (2009) ont confrontées aux réalités de la robotique récente. La première loi, interdisant de blesser les humains, est déjà transgressée, avec l'émergence des robots militaires comme les drones armés. Selon eux, les deuxième et troisième lois sur l'obéissance et l'autoprotection, sont trop floues, et dépendent de la première loi. Par conséquent, ils proposent une alternative à ces lois pour une robotique plus « responsable et résiliente », plus centrée sur l'homme (cf. Tableau 36).

La question sous-jacente à leur proposition est celle de la morale¹¹⁷ des robots, en d'autres mots, quelle éthique doit-on inculquer aux robots ? Bien que cela soit actuellement discuté, nous sommes encore loin d'avoir abouti à un consensus qui permettrait d'aller plus loin sur la façon d'inculquer l'autonomie, l'autorité et la responsabilité des robots, de l'opérateur, de l'entreprise, du concepteur et du fournisseur.

	<i>Lois d'Asimov</i>	<i>Lois alternatives</i>
1.	Un robot ne peut porter atteinte à un être humain, ni, en restant passif, permettre qu'un être humain soit exposé au danger.	Un homme ne doit pas déployer un robot sans que le système homme-robot ne soit conforme aux règles de sécurité et d'éthique.
2.	Un robot doit obéir aux ordres qui lui sont donnés par un être humain, sauf si de tels ordres entrent en conflit avec la première loi.	Un robot doit répondre aux hommes selon leurs rôles.
3.	Un robot doit protéger son existence tant que cette protection n'entre pas en conflit avec la première ou la deuxième loi.	Un robot doit être doté de l'autonomie suffisante pour se protéger, tant que cette protection n'interfère pas avec les deux premières règles.

Tableau 36 : Les lois d'Asimov et l'alternative proposée par Murphy et Woods (2009)

La « morale d'un robot » pourrait permettre de résoudre des dilemmes de façon la plus raisonnable possible (Allen, Wallach, & Smit, 2006), d'éviter des accidents graves¹¹⁸. Nous avons déjà des robots ou logiciels qui violent les standards de l'éthique, comme par exemple les moteurs de recherche qui utilisent des données privées. Selon Allen et al. (2006), le challenge actuel de l'éthique des machines (*machine ethics*) est cantonné à la « moralité artificielle », c'est-à-dire à la recherche de moyens

¹¹⁷ « Morale » et « éthique », tous deux étymologiquement « relatif aux mœurs », sont ici utilisés indifféremment. L'éthique est souvent utilisée pour traiter de la morale en pratique, tandis que la morale est en général une notion utilisée de façon plus abstraite.

¹¹⁸ La robotique industrielle a déjà causé de nombreux accidents. En Allemagne par exemple, de 3 à 15 accidents graves (perte de membre ou décès) par an ont été recensés entre 2005 et 2012 (Robotic Industries Association, 2015).

permettant aux machines d'agir comme si elles étaient des « agents moraux », dans une approche computationnelle. On peut cependant émettre des doutes quant à la validité d'une telle éthique, mimant la moralité humaine sans fonctionner de la même manière (sans émotion par exemple). Dans les années à venir, quoiqu'il en soit, le travail sur la problématique des machines éthiques ne peut être mené qu'en réunissant des philosophes, roboticiens et informaticiens, juristes, psychologues, etc.

Conclusion

Au cours des dernières décennies, les robots ont largement été répandus dans l'industrie, d'abord pour accomplir des tâches simples et répétitives, puis pour aborder des tâches de plus en plus compliquées. Une des limites actuelles de la robotique est la complexité des tâches. Elles ne peuvent être réalisées sans un haut pouvoir d'adaptation, autrement dit aujourd'hui sans la plasticité de la cognition humaine. La cobotique est récemment apparue comme « le domaine » de la collaboration homme-robot. Elle est une perspective pour aider l'homme, l'augmenter, dans la réalisation de tâches complexes pour l'Industrie du Futur. Jusqu'à présent et pour les prochaines années, elle s'inscrit dans le cadre de la collaboration homme-artefact.

La cognition de l'homme fait de lui un système de régulation extrêmement plastique et efficace pour gérer les variabilités industrielles tout en s'y adaptant. Lorsqu'ils collaborent, homme et robot ont des objectifs communs, une tâche commune. Le partage de la tâche est rendu possible par des interactions qui permettent et facilitent cette collaboration. L'homme et le robot peuvent avoir différents rôles, qui traduisent l'implication de l'homme dans la tâche et l'autonomie du robot (ses capacités d'auto-apprentissage, d'auto-adaptation). Néanmoins, quelle que soit cette autonomie, c'est la complémentarité de l'homme et du robot qui assure l'augmentation de la performance.

Pour délimiter notre objet d'étude, nous avons ainsi introduit le concept de système cobotique. Le système cobotique est un système cybernétique auto-organisé. Il comprend l'homme et le robot, qui sont en interaction pour réaliser une tâche commune.

Dans ce contexte, la cobotique est une perspective attrayante pour l'industrie. Elle doit correspondre aux besoins de ce domaine d'application, aux contraintes et exigences qui lui sont liées : la performance, la sécurité, le respect de la réglementation, et l'acceptation par les équipes de production.

Pour mettre au point des robots industriels, les approches de conception sont le plus souvent centrées sur la technologie, issues de la « robotique classique ». Elles sont donc peu adaptées pour mettre au point des systèmes cobotiques au sein desquels homme et robot collaborent. La conception des systèmes cobotiques doit évidemment prendre en compte les technologies émergentes, mais elle doit aussi prendre en compte l'homme, grâce à l'analyse de l'activité et la simulation participative.

Nous avons proposé de désigner notre approche de conception par l'« ingénierie des systèmes cobotiques ». Constatant que l'homme était souvent mal intégré dans les projets, nous avons introduit un indicateur d'intégration de l'homme : le HIRL (Human Integration Readiness Level).

L'approche méthodologique a été expérimentée afin de satisfaire un besoin industriel de la société Ariane Group : le nettoyage des cuves¹¹⁹. Dans cette thèse, l'analyse du besoin se base sur le travail réel des opérateurs. Elle est le socle de l'expérimentation que nous avons menée, et permet de récolter une grande quantité d'informations et de connaissances déterminantes pour la suite de la conception.

L'équipe projet a mis au point un principe de solution cobotique qui a fait l'objet d'une simulation numérique basique, évaluée et améliorée par les opérateurs. Puis, pour simuler les interactions homme-robot, un binôme cognicien/roboticien a réalisé une maquette interactive qui a, elle aussi, été évaluée et améliorée par les opérateurs. Enfin, en partenariat avec le CEA Tech, le prototype de nettoyage des cuves a apporté des résultats sur le procédé de nettoyage robotique et les interactions dans des conditions bien plus représentatives.

Au sein d'Ariane Group, nous avons répondu à d'autres besoins industriels variés, concernant des opérations de finition et de manutention. Cela a particulièrement enrichi le bilan de l'approche méthodologique. Celle-là devra d'ailleurs être complétée, en particulier du point de vue des outils méthodologiques, pour mieux accompagner les projets de conception. Ce sera l'objet de la mission qui nous est maintenant confiée au sein d'Ariane Group.

La cobotique industrielle cherche une combinaison entre les capacités de l'homme et du robot pour améliorer la performance industrielle et les conditions de travail. Bien qu'elle soit en plein essor, il lui reste de nombreux défis à relever pour une collaboration plus poussée. Ces défis concernent bien entendu l'intelligence artificielle, mais aussi l'interaction, les usages, la sécurité ou la certification. Nous prévoyons que les systèmes cobotiques seront une des clés de l'Industrie du Futur, qui pourra s'appuyer sur leur flexibilité et leur connectivité à l'écosystème technologique des ateliers 4.0¹²⁰.

Nous proposons de définir la cobotique comme la collaboration homme-robot. Elle est un domaine émergent dans l'industrie, dont les applications sont multiples : téléopération (collaboration à distance), coprésence collaborative (partage du même espace de travail), comanipulation (collaboration avec contact physique), voire exomanipulation (collaboration avec un robot revêtu par l'homme, ou exosquelette).

Pour profiter des avancées technologiques du domaine de la cobotique, Safran Group et Ariane Group ont associé en thèse CIFRE un binôme d'ingénieurs en robotique et cognitive. Il avait pour mission la mise au point d'une approche méthodologique pouvant être généralisée. L'approche a été éprouvée sur un projet industriel à Ariane Group : le nettoyage des cuves. Ce projet permettra d'améliorer un poste pyrotechnique du cycle de fabrication des propulseurs de la fusée Ariane.

Le nettoyage des cuves est une étape déterminante de la fabrication des *boosters*, qui assurent la première phase de propulsion de la fusée grâce à un matériau pyrotechnique. La cuve sert à cette fabrication, puis doit être nettoyée ; l'opération actuelle est réalisée à l'aide d'outils simples. Elle est physiquement pénible puisque le produit à nettoyer est collant et visqueux. De plus, les opérateurs sont dans une zone pyrotechnique susceptible d'être dangereuse pendant les activités. Malgré plusieurs tentatives, aucune solution n'avait été trouvée ni pour aider les opérateurs, ni pour automatiser l'opération.

Nous avons donc cherché à évaluer l'apport de la cobotique (collaboration homme-robot) pour résoudre ce problème. Pour cela, nous nous sommes principalement basés sur des analyses poussées de l'activité des opérateurs, puis sur des simulations à l'aide de maquettes et de prototypes. Aujourd'hui, un prototype de robot piloté à distance (pour des raisons de sécurité) prometteur a été

¹¹⁹ Les cuves sont empreintes de produit pyrotechnique collant et dangereux, difficile à nettoyer.

¹²⁰ En référence à la version allemande de l'Industrie du Futur, désignée « Factory 4.0 ».

évalué avec les opérateurs. La préparation des étapes suivantes pour arriver jusqu'à une mise en service est en cours depuis quelques semaines.

En plus d'une amélioration évidente des conditions de travail et de la sécurité des opérateurs, la transformation du poste pyrotechnique de nettoyage des cuves doit apporter un gain en temps de cycle dans la perspective de l'augmentation des cadences pour Ariane 6.

Au sein d'Ariane Group, ce projet innovant en fait émerger bien d'autres. C'est le cas pour d'autres applications pyrotechniques, mais aussi pour de la manutention et de l'assemblage. Les projets « cobotique » s'inscrivent dans un projet plus large d'Industrie du Futur. La cobotique y jouera un rôle majeur pour améliorer la performance industrielle et les conditions de travail, dans des domaines cruciaux et stratégiques qui s'accroissent mal des délais et des incertitudes.

Les usines des industriels comme Ariane Group et Safran Group comportent des postes, voire des lignes de production qui ne donnent pas entière satisfaction, du point de vue de la performance (efficacité et efficience) et/ou des conditions de travail. Bien qu'identifiés comme problématiques, certains de ces postes perdurent dans les usines pour deux raisons principales.

La première est d'ordre économique. Une « automatisation totale » engendrerait un retour sur investissement insuffisant, en raison du coût de la solution technique, et des gains récurrents envisagés. Les gains récurrents du poste sont conditionnés par les cadences, le besoin d'expertise humaine pour surveiller l'opération, les coûts de maintenance, etc.

La seconde raison est d'ordre technique. C'est ainsi que certains postes insatisfaisants perdurent à cause de la complexité de la tâche à accomplir. Cette complexité a une forte incidence sur le coût de la solution lorsque l'on adopte l'approche d'« automatisation totale », généralement pratiquée en robotique classique. En effet, pour gérer la complexité, le robot doit par exemple être doté de capteurs supplémentaires et d'algorithmes poussés, qui permettent d'analyser l'environnement et d'adapter son comportement. Parfois, la tâche est même si complexe qu'infaisable sans expertise humaine avec les technologies disponibles.

La discipline émergente qu'est la cobotique semble permettre de répondre à ce besoin industriel. Le terme « cobotique » est parfois accaparé par les roboticiens pour désigner la prise en compte de la sécurité pour partager l'espace de travail. La cobotique désigne alors en quelque sorte une branche satellite de la robotique. Or, à l'évidence, la collaboration homme-robot est plus large. Elle requiert la prise en compte de l'homme. La cobotique est donc un domaine transdisciplinaire qui ne peut se limiter aux compétences des roboticiens classiques.

Ariane Group et Safran Group ont depuis longtemps constaté les opportunités offertes par la cobotique, et ont donc entamé des recherches sur le sujet. Deux thèses ont été proposées de manière intégrée : une en robotique et une en cognitive. Cette thèse correspond à la réponse à cette demande, et j'ai été recruté en tant qu'ingénieur en cognitive¹²¹ pour participer aux travaux sur la cobotique au sein d'une équipe initialement pluridisciplinaire. Nous y avons conjointement développé les concepts de système cobotique et d'ingénierie des systèmes cobotiques. Nous l'avons montré dans cette thèse, ces concepts permettent d'aborder la conception de la collaboration homme-robot dans l'industrie. Les produits de l'équipe sont interdisciplinaires puisqu'ils résultent d'expertises en cognitive, en robotique, en ergonomie, en ingénierie, etc. Chacun des membres de l'équipe a évolué vers l'interdisciplinarité, pour devenir un spécialiste de la cobotique, spécialité aujourd'hui établie dans le groupe industriel.

¹²¹ La cognitive est la science qui s'intéresse au traitement de la connaissance, qu'elle soit humaine ou informatisée.

Nous avons, ensemble, précisé le périmètre de la cobotique. Elle ne cherche pas à « remplacer des opérateurs par des robots », puisque l'homme en tant que système de régulation est irremplaçable dans le système cobotique. Elle ne consiste pas non plus à « supprimer les barrières entre les opérateurs et les robots », cela réduirait la collaboration à l'ajout de capteurs de sécurité. Elle n'est donc aucunement une simple sous-discipline de la robotique.

La cobotique industrielle permet d'augmenter les opérateurs, elle est un des domaines de l'augmentation de l'homme. Parmi ces domaines, on retrouve également la réalité virtuelle ou augmentée, l'intelligence artificielle ou augmentée, et les objets connectés. Ces thèmes de l'Industrie du Futur permettront d'aider les opérateurs à mieux produire. Forte de ces technologies, l'Industrie du Futur abritera de nombreux agents artificiels et humains interconnectés en réseau. Elle sera alors elle-même un « sur-système » complexe, auto-organisé pour produire, pour innover, et pour inventer.

La cobotique ne se cantonne pas à l'industrie. Elle est aussi une perspective importante pour le domaine du nucléaire (Garrec, et al., 2010), de la santé (Poirot-Mazères, 2013), la suppléance et le handicap (Morinière, Verney, Abroug, Garrec, & Perrot, 2015; De Santis, Di Gironimo, Marzano, Siciliano, & Trallo, 2008), la domotique¹²², le militaire¹²³, ou l'éducation (Roy, et al., 2015).

Les travaux présentés dans cette thèse offrent des solutions pour des postes de travail insatisfaisants auxquels aucune solution n'avait été trouvée. Ils ont fait émerger à Ariane Group et Safran Group de nombreux autres sujets. Menacée par la montée de la compétition mondiale avec les lanceurs concurrents émergeant aux États-Unis, au Japon, en Chine, etc., Ariane Group considère la cobotique comme un domaine stratégique. Souhaitant s'inscrire dans la continuité des développements des thèses, les deux ingénieurs recrutés en CIFRE ont vu leur contrat reconduit et stabilisé. Ils auront pour principale mission la mise en place de systèmes cobotiques, pour les postes d'aujourd'hui et les usines de demain. Cette mission nécessitera bien évidemment de continuer à développer les collaborations avec le milieu académique afin de promouvoir une approche interdisciplinaire de conception de systèmes cobotiques.

¹²² Pour la domotique, il existe déjà des robots aspirateurs tels que le modèle bien connu « Roomba® » de la société « iRobot ».

¹²³ Dans le domaine militaire, il s'agit par exemple de drones, de robots mobiles ou d'exosquelettes, comme ceux développés par Safran Electronics and Defense pour le fantassin du futur.

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 – Communication orale, publication dans les actes – *Les Interactions Homme Robot pour la Cobotique Industrielle* - Théo Moulières-Seban, David Bitonneau, Jean-Marc Salotti, Jean-François Thibault et Bernard Claverie
- **Conférence de la Société d'Ergonomie de Langue Française (SELF 2016)** – Marseille – Communication orale, publication dans les actes – *La Cobotique : un domaine pluridisciplinaire émergent utile à l'ergonome* - Théo Moulières-Seban, David Bitonneau, Jean-Marc Salotti, Jean-François Thibault et Bernard Claverie
- **IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2017)** (co-auteur) – Taïwan – 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
- **@ctivités** – À paraître (avril 2018) - *La Cobotique : un domaine émergent qui intègre l'homme dans la conception.*
- **Space Propulsion** – À paraître (SP 2018) - Séville – Communication orale, publication dans les actes - *Designing Human Robot Collaboration for the Space Factories of the Future.*

Communications et conférences

- **Journée Nationale de la Robotique Interactive** - GDR Robotique (2014), Toulouse (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 (ICSR 2015), Paris (poster et table ronde), *Cobotic systems for industrial application* – David Bitonneau et Théo Moulières-Seban
- **Innovorg** (2017), Nancy (Communication orale), *La cobotique : de nouveaux outils d'aide à la production et à la prévention* – Théo Moulières-Seban
- **DAS IHS pôle Aerospace Valley** (2015 et 2017), Agen (Communication orale) – Théo Moulières-Seban
- **Congrès de la Federation of European Ergonomics Societies (FEES 2017)**, Pologne (Communication orale), *Simulation for Designing Industrial Cobotic Systems* – Théo

Moulières-Seban, David Bitonneau, Jean-Marc Salotti, Jean-François Thibault et Bernard Claverie

- **Conférence FEBC** (2017), Bruxelles (Communication orale), *Designing industrial cobotic systems through a participative approach* - Théo Moulières-Seban
- **Journée Nationale de la Robotique Interactive** - GDR Robotique (2017), Paris (Communication orale), *Conception d'un système cobotique industriel à travers une approche participative* - David Bitonneau et Théo Moulières-Seban

Participations

Évènements

- Salon Innorobo, 2014, Lyon
- Séminaire « Les défis de la collaboration homme-robot » Chaire Mines Paristech PSA, 2015, Paris
- Journée de la robotique collaborative industrielle, 2016, Paris
- Séminaire de la chaire STAH (Systèmes Technologiques pour l'Augmentation de l'Humain), 2016, Talence
- Journée du Cluster Aquitaine Robotics, 2016, Talence
- Rencontre « Des robots et des hommes, vers quels modes de coopération ? », Cycle de Rencontres Objectif ESOF, 2018, Toulouse
- Conférence « Nous, les Robots », 2017, Talence

Visites de sites industriels et technologiques

- Plateforme du CEA Tech, 2015, Saclay
- Plateforme robotique de PSA, 2016, Vélizy
- Usine du constructeur de supports de robots Lucas, 2014 et 2017, Bazas
- Sites d'Ariane Group (Le Haillan et Saint-Médard-en-Jalles fréquemment, Issac 2016 et 2017, Les Mureaux 2017, Vernon 2017)
- Usine Regulus¹²⁴ et Centre Spatial Guyanais (Kourou 2016)
- 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'ENSC¹²⁵ « Simulation et cobotique » (2015)
- Participation à la journée de la robotique à l'ENSEIRB-MATMECA (2016)
- Encadrement de 3 stagiaires ingénieurs à Ariane Group (2016 et 2017)

¹²⁴ Filiale à 40 % Ariane Group et 60 % Avio.

¹²⁵ Ecole Nationale Supérieure de Cognitique, faisant partie du groupe d'écoles Bordeaux INP (Institut National Polytechnique).

Notes techniques et communications internes Ariane Group

Les éléments recensés ici ont été le fruit d'un travail d'équipe avec David Bitonneau, doctorant roboticien, et nos collègues d'Ariane Group et de Safran Group.

Notes techniques

- 2014
- Compte rendu de réunion de lancement du projet Cobotique (Bitonneau D. et Moulières-Seban T.)
 - Observation de robots à Roxel (Bitonneau D. et Moulières-Seban T.)
 - Définition des paramètres des essais d'hydrogommage pour le nettoyage de cuves de propergol 420 G (Moulières-Seban T. et Bitonneau D.)
 - Réunion planification essais hydrogommage (Bitonneau D. et Moulières-Seban T.)
 - Analyse des risques du projet cobotique (Moulières-Seban T. et Bitonneau D.)
 - Mise à jour Analyse des Risques projet cobotique Herakles (Moulières-Seban T. et Bitonneau D.)
 - Organisation des essais hydrogommage sur cuve 420 G avec inerte (Bitonneau D. et Moulières-Seban T.)
 - Mesure de pégosité et viscosité de propergol pour les essais d'hydrogommage (Bitonneau D. et Moulières-Seban T.)
 - Mesure de pégosité et viscosité d'inerte pour les essais d'hydrogommage (Moulières-Seban T. et Bitonneau D.)
 - Analyse Fonctionnelle du poste de nettoyage des cuves 420 G (Moulières-Seban T. et Bitonneau D.)
 - Hydrogommage - essai de filtration des eaux - compte rendu (Moulières-Seban T. et Bitonneau D.)
 - Mode opératoire pour essai complémentaire nettoyage de cuve avec inerte par hydrogommage (Bitonneau D. et Moulières-Seban T.)
- 2015
- Réunion de lancement d'un nouveau sujet cobotique : le démoulage des blocs de contrôle (Moulières-Seban T. et Bitonneau D.)
 - Améliorations du poste de nettoyage des cuves 420 G (Bitonneau D. et Moulières-Seban T.)
 - Compte rendu de l'essai complémentaire nettoyage de cuve 420 G avec inerte, par hydrogommage (Bitonneau D. et Moulières-Seban T.)
 - Mesure de pégosité et viscosité dynamique de propergol suivant la température et la durée de réticulation (Bitonneau D. et Moulières-Seban T.)
 - Retour d'expérience du cobot à SNECMA Genevilliers (Moulières-Seban T. et Bitonneau D.)
 - Retour sur les offres répondant au CDC du nettoyage des cuves de propergol 420 G (Moulières-Seban T. et Bitonneau D.)
 - Réalisation d'un démonstrateur pour le nettoyage de cuve - Expression du besoin (Moulières-Seban T. et Bitonneau D.)
 - Formalisation de l'analyse du poste de démoulage des petits blocs (Moulières-Seban T. et Bitonneau D.)

- 2016
- Retour d'expérience sur la machine nettoyage cuve 1800 G UPG (Bitonneau D. et Moulières-Seban T.)
 - Analyse des réponses au cahier des charges du prototype (Moulières-Seban T. et Bitonneau D.)
 - Aspects sécurité de l'observation du retrait des voiles par des caméras (Bitonneau D. et Moulières-Seban T.)
 - ROI d'amélioration du nettoyage de cuve 1800 G à UPG (Bitonneau D. et Moulières-Seban T.)
 - Compte-rendu de la mission d'observation du poste de nettoyage des cuves à UPG (Moulières-Seban T. et Bitonneau D.)
 - Compte-rendu de la journée de la robotique collaborative industrielle (Bitonneau D. et Moulières-Seban T.)
 - ADR du prototype cobotique nettoyage des cuves (Moulières-Seban T. et Bitonneau D.)
 - Couplage du dispositif haptique à une simulation robotique (Bitonneau D. et Moulières-Seban T.)
 - Retour d'expérience sur le poste de nettoyage de cuve de lieur/liant chez Roxel (Bitonneau D. et Moulières-Seban T.)
- 2017
- État de l'art des dispositifs de contrôle haptiques pour le pilotage à distance d'un robot (Moulières-Seban T. et Bitonneau D.)
 - Rapport de test utilisateur sur le pilotage à distance d'un robot pour le nettoyage des cuves (Moulières-Seban T. et Bitonneau D.)
 - Intégration d'un dispositif haptique pour le prototype de nettoyage téléopéré des cuves (Bitonneau D. et Moulières-Seban T.)
 - Les indicateurs de maturité humaine et technologique (Moulières-Seban T. et Bitonneau D.)
 - Prototype de nettoyage des cuves - Hypothèses et dispositif d'expérience (Bitonneau D. et Moulières-Seban T.)
 - Prototype de nettoyage des cuves - Essais de raclage automatique (robotique) sur inerte (Bitonneau D. et Moulières-Seban T.)
 - A6 - Cobot system for tank cleaning - Conclusions of the prototype and next steps (Moulières-Seban T. et Bitonneau D.)

Communications au sein d'Ariane Group

- 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 Herakles¹²⁶ - 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 :

¹²⁶ Safran Herakles et Airbus DS ont depuis fusionné pour former Ariane Group.

- 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 Group

- 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.

Glossaire

Acceptabilité : propension d'un dispositif technique à être accepté par ses utilisateurs.

Automatisation : système préprogrammé, agissant de façon prévisible et indépendante de la situation, et des résultats vis-à-vis de l'objectif (NATO Allied Command Transformation, 2014).

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 (Chatila, 2014).

Cobot : type de robot, spécialement conçu pour partager son espace de travail avec un humain, amplifier ou fiabiliser son action ou son comportement, sans le mettre en danger.

Robotique : domaine 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 (Claverie, Le Blanc, & Fouillat, 2013).

Cognitive : science du traitement de la connaissance, que celle-ci soit humaine ou informatisée.

Collaboration ou coopération : travail de plusieurs agents dans la réalisation d'une tâche commune (Terveen, 1995).

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.

Effecteur : outil d'un robot.

Ergonomie : science qui s'intéresse à l'homme en activité dans son environnement de travail. La finalité première 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 (Guerin, Laville, Daniellou, Duraffourg, & Kerguelen, 1991).

Exomanipulation : collaboration homme-robot pour laquelle le robot est revêtu par l'homme. Les dispositifs d'exomanipulation sont appelés « exosquelettes (actifs, sans quoi ils ne satisfont pas à la définition de "robot") ».

Industrie du Futur : « concept générique qui s'inscrit dans une prise de conscience générale de l'importance de l'industrie manufacturière dans la richesse nationale » (FIM, 2015).

Moyen d'assistance : dispositif qui aide l'opérateur cognitivement et/ou physiquement dans sa tâche.

Opérateur : homme au travail.

PROMPT (Project Reporting, Organization & Management Planning Technique) : conduite de projet adoptée par le groupe Safran.

Robot : « machine matérielle essentiellement munie d'*actionneurs* lui permettant de se mouvoir, ou de déplacer une partie de son corps dans l'espace, de *capteurs* qui acquièrent des données sur son environnement ou sur elle-même, ainsi que de *processeurs*, des calculateurs qui sont des moyens de traitement de l'information » (Chatila, 2014).

Robotique : discipline qui s'intéresse à la conception, la réalisation, l'évaluation et l'utilisation des robots.

Système cobotique : système au sein duquel homme et robot interagissent pour satisfaire un objectif commun.

Système robot : « 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 » (d'après la norme ISO 837:2012).

Tâche : réalisation d'un procédé pour atteindre des objectifs.

Téléopération : « ensemble de techniques qui permettent à l'homme de transposer ses capacités d'action (observation, manipulation) en temps réel à distance grâce à des retours sensoriels » (Garrec, et al., 2010).

Bibliographie

- Acoulon, S. (2013). *Les robots collaboratifs - Guide d'intégration de la santé et de la sécurité*. CETIM.
- Adamides, G., Christou, G., Katsanos, C., Xenos, M., & Hadzilacos, H. (2015). Usability Guidelines for the Design of Robot Teleoperation: A Taxonomy . *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, (pp. 256-262).
- Akella, P., Peshkin, M., Colgate, E., Wannasuphoprasit, W., Nagesh, N., Wells, J., . . . Peacock, B. (1999). Cobots for the automobile assembly line. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (pp. 728-733).
- Allen, C., Wallach, W., & Smit, I. (2006). Why Machine Ethics? *IEEE Intelligent Systems*, 12-17.
- Alliance Industrie du Futur. (2016). *Priorités de l'Alliance Industrie du Futur en matière de normalisation et de standardisation*.
- Andersson, N., Argyrou, A., Nägele, F., Ubis, F., Esnaola Campos, U., Ortiz de Zarate, M., & Wilterdink, R. (2016). AR-Enhanced Human-Robot-Interaction - Methodologies, Algorithms, Tools. *6th CIRP Conference on Assembly Technologies Systems*, (pp. 193-198).
- Angeles, J., & Park, F. C. (2007). Performance Evaluation and Design Criteria. Dans B. & Siciliano, *Springer Handbook of Robotics* (pp. 229-244). Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc.
- Arai, T., Kato, R., & Fujita, M. (2010). Assessment of operator stress induced by robot collaboration in assembly. *CIRP Annal Manufacturing Technology*, (pp. 5-8).
- Aries, S., Le Blanc, B., & Ermine, J. L. (2008). MASK : une méthode d'ingénierie des connaissances pour l'analyse et la structuration des connaissances. Dans J. L. Ermine, *Management et ingénierie des connaissances*. Hermès.
- Asimov, I. (1942). Runaround. *Astounding Science Fiction*.
- Atain Kouadio, J. J., Sghaier, A., & Picot, D. (2014). Les Robots d'assistance physique : fonctionnement et modes d'utilisation en industrie. *50ème Congrès de la SELF*, (pp. 560-567).
- Baddeley, A. D. (1986). *Working Memory*. Oxford: Clarendon Press.
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of Automation. (P. P. Ltd., Éd.) *Automatica*, 19(6), 775-779.

-
- Bannat, A., Bautze, T., Beetz, M., Blume, J., Diepold, K., Ertelt, C., . . . Zaech, M. F. (2011). Artificial Cognition in Production Systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 8(1), 148-174.
- Barbé, L. (2008). *Téléopération avec retours d'efforts pour les interventions percutannées (Thèse de doctorat)*. Université Louis Pasteur - Strasbourg I, 2007.
- Barcellini, F., Van Belleghem, L., & Daniellou, F. (2013). Les Projets de conception comme opportunité de développement des activités. *Ergonomie Constructive*, (pp. 191-206).
- Bartneck, C., Kulic, D., Croft, E., & Zoghbi, S. (2009). Measurement Instruments for the Anthropomorphism, Animacy, Likeability, Perceived Intelligence, and Perceived Safety of Robots. *International Journal of Social Robotics*, 71-81.
- Bauer, A., Wollherr, D., & Buss, M. (2008). Human-Robot Collaboration: A Survey. *International Journal of Humanoid Robotics*, 5(1), 47-66.
- Bédard, J., & Chi, M. (1992). Expertise. *Psychological Science*, 135-139.
- Béguin, P. (2007). Prendre en compte l'activité de travail pour concevoir. *@ctivités*, 4(2), 107-114.
- Bellet, T. (1998). *Modélisation et simulation cognitive de l'opérateur humain : une application à la conduite automobile (Thèse de doctorat)*. Université Paris V.
- Bellet, T., Bailly, B., Mayenobe, P., & Georgeon, O. (2007). Cognitive modelling and computational simulation of drivers mental activities. Dans P. C. Cacciabue, *Modelling Driver Behaviour in Automotive Environment: Critical Issues in Drivers Interactions with Intelligent Transport Systems* (pp. 315-343). Springer.
- Bellet, T., Bailly-Asuni, B., Banet, A., & Mayenobe, P. (2009). A theoretical and methodological framework to study and modelling drivers mental representations. *Safety Science*, 47(9), 1205-1221.
- Bellet, T., Mayenobe, P., & Bornard, J. C. (2010). How to investigate the living cognition : An application to dynamic simulation of mental activities while driving. *International Conference on Cognitive Modeling*, (pp. 1-6). Philadelphia.
- Berthoz, A. (2003). *La Décision*. Odile Jacob.
- Bethel, C. L., Salomon, K., Murphy, R. R., & Burke, J. L. (2007). Survey of Psychophysiology Measurements Applied to Human-Robot Interaction. *IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication*, (pp. 732-737).
- Bey, C. (2016). *Gestion des ressources cognitives et stratégies d'adaptation court terme chez les pilotes d'aéronefs (Thèse de doctorat)*. Université de Bordeaux.
- Billings, C. E. (1996). *Aviation Automation: The Search for A Human-centered Approach (Human Factors in Transportation)*. CRC Press.
- Bitonneau, D. (2018). *Conception de systèmes cobotiques industriels, aspects robotiques et prise en compte des facteurs humains (Thèse de doctorat à paraître)*. Université de Bordeaux.
- Blanchard, C., & Ollivier, L. (2015). L'accompagnement de projet, un tremplin vers la performance pour l'entreprise et l'ergonome. *Congrès international de la SELF*, (pp. 60-68).
-

- Bobillier-Chaumon, M. E., & Dubois, M. (2009). L'adoption des technologies en situation professionnelle : quelles articulations possibles entre acceptabilité et acceptation. *Le Travail Humain*, 72(4), 355-382.
- Bornard, J. C. (2012). *Développement d'un modèle du conducteur automobile : De la modélisation cognitive à la simulation numérique (Thèse de doctorat)*. Université de Bordeaux.
- Boy, G. A. (1998). Cognitive Function Analysis for Human-Centered Automation of Safety-Critical Systems. 265-272.
- Boy, G. A. (2002). Theories of Human Cognition: To Better Understand the Co-Adaptation of People and Technology. Dans L. Kiel, *Knowledge Management, Organizational Intelligence and Learning, and Complexity in Encyclopedia of Life Support Systems*. Eolss Publishers.
- Boy, G. A. (2003). *Ingénierie cognitive : IHM et cognition*. Hermes science.
- Boy, G. A. (2005). Maturité, Automation et Expérience des Utilisateurs. *IHM* (pp. 313-320). Toulouse, France: ACM.
- Boy, G. A. (2009). The Orchestra: A conceptual model for function allocation and scenario-based engineering in multi-agent safety-critical systems. *European Conference on Cognitive Ergonomics*. Helsinki, Finland.
- Boy, G. A. (2011). Design for Safety: A Cognitive Engineering Approach. Dans Y. Barnard, R. Risser, & J. Krems, *The Safety of Intelligent Driver Support Systems*. Ashgate.
- Boy, G. A., & McGovern Narkevicius, J. (2014). Unifying Human Centered Design and Systems Engineering for Human Systems Integration. Dans M. Aiguier, F. Boulanger, D. Krob, & C. Marchal, *Complex Systems Design and Management* (pp. 151-162). Springer.
- Boy, G. A., & Schmitt, K. A. (2012). Design for Safety: A cognitive engineering approach to the control and management of nuclear power plants. *Annals of Nuclear Energy*.
- Boyd, J. R. (1987). *The Essence of Winning and Losing*. Maxwell Air Force Base, AL: Air University Library Document No. M-U 43947 (Briefing slides).
- Boyer, R., & Freyssenet, M. (2000). *Les Modèles productifs*. La Découverte.
- Brangier, E., Hammes-Adelé, S., & Bastien, J. M. (2010). Analyse critique des approches de l'acceptation des technologies : de l'utilisabilité à la symbiose humain-technologie-organisation. *Revue européenne de psychologie appliquée*, 129-146.
- Capek, K. (1920). *R. U. R. (Rossum's Universal Robots)*.
- Cellier, J. M. (1996). Exigences et gestion temporelle dans les environnements dynamiques. Dans J. M. Cellier, V. De Keyser, & C. Valot, *La gestion du temps dans les environnements dynamiques* (pp. 20-48). Paris: PUF.
- CETIM. (2013). *IDAR® Une méthode d'analyse des risques dans le cadre de la directive « Machines »*.
- Chalandon, X. (2007). *Conscience de la situation : invariants internes et invariants externes (Thèse de doctorat)*. Conservatoire national des arts et métiers.
- Chatila, R. (2014). Robotique et simplicité : modèles, architecture, décision et conscience. Dans A. Berthoz, & J. Petit, *Complexité-Simplicité*. Paris: Collège de France.

-
- Claverie, B. (2005). *Cognitive : Science et pratique des relations à la machine à penser*. L'Harmattan.
- Claverie, B. (2010). *L'homme augmenté*. Hermès.
- Claverie, B. (2010). Pluri-, inter-, transdisciplinarité : ou le réel décomposé en réseaux de savoir. *Revue internationale de Projectique*, 1(4), 5-27.
- Claverie, B. (2014). De la cybernétique aux NBIC : l'information et les machines vers le dépassement humain. *Hermès*(68), 95-101.
- Claverie, B. (2016). La perspective artificielle des sens. *Hermès*, 74, 183-187.
- Claverie, B. (2017). Histoire naturelle de l'Intelligence Artificielle. *Intelligence Artificielle - Autonomie, délégation et responsabilité*. Bordeaux.
- Claverie, B., & Fouillat, P. (2010). L'évolution disciplinaire des sciences de l'information : des technologies à l'ingénierie des usages. *Projectique*, 79-106.
- Claverie, B., Le Blanc, B., & Fouillat, P. (2013). La Cobotique. *Presses univ. de Bordeaux | « Communication & Organisation », vol.2 n° 44*, 203-214.
- Clot, Y. (1999). *La fonction psychologique du travail*. PUF.
- Cloud, W. (1965, Novembre). Man Amplifiers: Machines That Let You Carry a Ton. *Popular Science*, 70-72,204.
- Coiffet, P. (1996). *Robots : définitions et classification*. Les techniques de l'ingénieur Publ.
- Colgate, J. E., Wannasupphrasit, W., & Peshkin, M. A. (1996). Cobots: Robots for Collaboration with Human Operators. *International Mechanical Engineering Congress and Exhibition*, (pp. 433-439). Atlanta, GA.
- Corbett, J. (1989). Automate or Innervate? The Role of Knowledge in Advanced Manufacturing Systems. *AI & Society*, 3(3), 198-209.
- Coutarel. (2004). *La prévention des troubles musculo-squelettiques en conception : quelles marges de manoeuvre pour le déploiement de l'activité ? (Thèse de doctorat)*. Université Bordeaux 2.
- Cummings, M. (2014). Man versus Machine or Man + Machine? *IEEE Intelligent Systems*, 29, 62-69.
- Daniellou, F. (2004). L'ergonomie dans la conduite de projets de conception de systèmes de travail. Dans P. Falzon, *Traité d'Ergonomie* (pp. 359-373). Paris: PUF.
- Daniellou, F. (2007). Simulating future work activity is not only a way of improving workstation design. *@ctivités*, 4(2), 84-90.
- Daniellou, F., & Béguin, P. (2004). Méthodologie de l'action ergonomique : approches du travail réel. Dans P. Falzon, *Traité d'Ergonomie* (pp. 333-358). Paris: PUF.
- De Rosnay, J. (1975). *Le Macroscopie - Vers une vision globale*. Seuil.
- De Santis, A., Di Gironimo, G., Marzano, A., Siciliano, B., & Trallo, A. (2008). A Virtual-Reality-based Evaluation Environment for Wheelchair-mounted Manipulators. *Eurographics Italian Chapter Conference*, (pp. 1-8).

- De Terssac, G., & Christol, J. (1982). Division du travail et savoir ouvrier. *Culture technique*(8), 141-145.
- Deisenroth, M. P., & Krishnan, K. K. (1999). On-line Programming. Dans S. Y. Nof, *Handbook of Industrial Robotics* (pp. 337-351). John Wiley & Sons.
- Dekker, S. W., & Woods, D. D. (2002). MABA-MABA or abracadabra? Progress on human-automation co-ordination. *Cognition Technology and Work*, 4(4), 240-244.
- Devy, M. (2012, Février). La cobotique : des robots industriels aux robots assistants, coopérants et co-opérateurs. *Annales des Mines - Réalités industrielles*(1), 76-85.
- Direction Générale des Entreprises. (2015). *Technologies Clés 2020*.
- (2004). *Directives ISO/CEI - Partie 2*. ISO/CEI .
- Drury, J. L., Scholtz, J., & Yanco, H. A. (2003). Awareness in Human Robot Interactions. *IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics*, (pp. 111-119). Washington, D.C., USA.
- Dumora, J., Geffard, F., Bidard, C., Aspragathos, A., & Fraise, P. (2013). Robot Assistance Selection for Large Object Manipulation with a Human. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*.
- Effidence. (2017). Récupéré sur Effidence, Intelligence for mobile robotics: <http://www.effidence.com/>
- Endsley, M. R. (1995). Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors*, 32-64.
- Endsley, M. R. (2015). *Autonomous Horizons: System Autonomy in the Air Force - A Path to the Future. Volume I: Human-Autonomy Teaming*. United States Air Force.
- Endsley, M. R., & Kaber, D. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42(3), 462-492.
- Endsley, M. R., & Kiris, E. O. (1995). The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation. *Human Factors*, 37(2), 381-394.
- Ermine, J. L. (2000). *Les systèmes de connaissances*. Hermès.
- Ermine, J. L. (2001). Capitaliser et partager les connaissances avec la méthode MASK. Dans M. Zacklad, & M. Grundstein, *Ingénierie et capitalisation des connaissances*. Hermès.
- Ermine, J. L., Chaillot, M., Bigeon, P., Charreton, B., & Malavieille, D. (1996a). MKSM, a method for knowledge management. (J. F. Shreinemakers, Éd.) *Knowledge Management, Organization, Competence and Methodology, Advances in Knowledge Management*, 1, 288-302.
- Ermine, J. L., Chaillot, M., Bigeon, P., Charreton, B., & Malavieille, D. (1996b). MASK, méthode pour la gestion des connaissances. (AFCET-Hermès, Éd.) *Ingénierie des Systèmes d'Informations*, 4(4), 541-575.
- Faber, M., Bützler, J., & Schlick, C. (2015). Human-robot cooperation in future production systems: Analysis of requirements for designing an ergonomic work system. *6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, (pp. 510-517).

-
- Faber, M., Sinem, K., Mertens, A., & Schlick, C. M. (2016). Model-Based Evaluation of Cooperative Assembly Processes in Human-Robot Collaboration. *Advances in Ergonomics of Manufacturing: Managing the Enterprise of the Future*, 490, pp. 101-112.
- Fang, H., Ong, S., & Nee, A. (2012). Interactive robot trajectory planning and simulation using Augmented Reality. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 227-237.
- Faverges, J. M. (1972). L'analyse du travail. Dans M. Reuchlin, *Traité de Psychologie Appliquée* (pp. 7-60). PUF.
- Ferrell, W., & Sheridan, T. (1967). Supervisory control of remote manipulation. *IEEE Spectrum*, 4(10), 81-88.
- Field, M., Stirling, D. A., Naghdy, F., & Pan, Z. (2009). Motion capture in robotics review. *IEEE International Conference on Control and Automation*, (pp. 1697-1702). Christchurch, New Zealand.
- Filippi, G., Haradji, Y., & Villame, T. (1995). Analyse de l'activité et coopération des acteurs de la conception. *Relations industrielles / Industrial Relations*, 50(4), 789-810.
- FIM. (2015). *Guide pratique de l'usine du futur - Enjeux et panorama de solutions*.
- Fiskel, J. (2003). Designing resilient, sustainable systems. *Environmental Science & Technology*, 37(23), 5330-5339.
- Fitts, P. M. (1951). *Human Engineering for an Effective Air Navigation and Traffic Control System*. Washington: National Research Council.
- Flemisch, F., Heesen, M., Hesse, T., Kelsh, J., Schieben, A., & Beller, J. (2012). Towards a dynamic balance between humans and automation: authority, ability, responsibility and control in shared and cooperative control situations. *Cogn Tech Work*, 3-18.
- Fuchs, P., Moreau, G., & Tisseau, J. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle - Volume 3*. Presse des Mines - Transvalor.
- Gambao, E., Hernando, M., & Surdilovic, D. (2012). A new generation of collaborative robots for material handling. *Gerontechnology*, 11(2).
- Garrec, P., Measson, Y., Gelin, R., Friconneau, J. P., Desbats, P., & Riwan, A. (2010). Téléopération: les applications en zone contrôlée. *Techniques de l'ingénieur*, S7812 1-S7812 15.
- Garrec, P., Riwan, A., David, O., & Measson, Y. (2010). Téléopération : Principes et technologies. *Techniques de l'Ingénieur*.
- Garrigou, A., Thibault, J. F., Jackson, M., & Mascia, F. (2001). Contributions et démarche de l'ergonomie dans les processus de conception. *PISTES*, vol.3 n°2.
- Gergondet, P., Druon, S., Kheddar, A., Hintmuller, C., Guger, C., & Slater, M. (2011). Using a brain-computer interface to steer a HRP-2 humanoid robot. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. Phuket, Thailand.
- Gonzalez, F., Gosselin, F., & Batcha, W. (2013). A framework for the classification of dexterous haptic interfaces based on the identification of the most frequently used hand contact areas. *IEEE World Haptics 2013*, (pp. 461-466).

- Goodrich, M. A., & Olsen, D. R. (2003). Seven Principles of Efficient Human Robot Interaction. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 4, pp. 3942-3948.
- Goodrich, M. A., & Schultz, A. C. (2007). *Human-Robot Interaction : A Survey*. Foundation and Trends® in Human-Computer Interaction, Vol. 1, No. 3, p. 203-275.
- Gosse, K., & Dancette, M. (2016). A quoi l'usine du futur ressemblera-t-elle ? *Anale des Mines - Réalités industrielles*(4), 27-31.
- Gosselin, F., & Andriot, C. (2011). Hardware devices of force feedback Interface. Dans P. Guitton, *Virtual Reality: Concepts and Technologies* (pp. 137-178). CRC Press .
- Gosselin, F., Bidard, C., & Brisset, J. (2005). Design of a High Fidelity Haptic Device for Telesurgery. *International Conference on Robotics and Automation*, (pp. 205-2010). Barcelona, Spain.
- Green, S., Billingham, M., Chen, X., & Chase, J. (2008). Human-Robot Collaboration: A Literature Review and Augmented Reality Approach in Design. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 5(1).
- Grosz, B. (1996). Collaborative Systems. *American Association for Artificial Intelligence Magazine*, 17(2), 67-85.
- Guerin, F., Laville, A., Daniellou, F., Duraffourg, J., & Kerguelen, A. (1991). *Comprendre le travail pour mieux le transformer. La pratique de l'ergonomie*. Ed. ANACT.
- Habib, L., Pacaux-Lemoine, M. P., & Millot, P. (2016). Towards adaptability of levels of automation with Human-Machine cooperation approach. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, (pp. 1081-1086). Budapest, Hongrie.
- Haddadin, S., Albu-Schäffer, A., & Hirzinger, G. (2007). Safety Evaluation of Physical Human-Robot Interaction via Crash-Testing. *Robotics: Science and Systems III*.
- Hägele, M., Schaaf, W., & Helms, E. (2002). Robot Assistants at Manual Workplaces: Effective Cooperation and Safety Aspects. *International Symposium on Robotics*.
- Hale, K., Fuchs, S., Carpenter, A., & Stanney, K. (2011). A Scale for Assessing Human Factors Readiness Levels. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, (pp. 2030-2034).
- Hall, E. T. (1963). A System for the Notation of Proxemic Behaviour. *American Anthropologist*, 65(5), 1003-1026.
- Hannun, A., Case, C., Catanzaro, B., Diamos, G., Elsen, E., Prenger, R., . . . Ng, A. (2014). Deep Speech: Scaling up end-to-end speech recognition. *arXiv preprint arXiv:1412.5567*.
- Hardin, B., & Goodrich, M. (2009). On Using Mixed-Initiative Control: A Perspective for Managing Large-Scale Robotic Teams. *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, (pp. 165-172). La Jolla, California.
- Hearst, M. A., Allen, J. F., Guinn, C. I., & Horvitz, E. H. (1999). Mixed Initiative Interaction. *IEEE Intelligent Systems, Trends & Controversies*, 14-23.
- Helander, M. (1990). Ergonomics and safety considerations in the design of robotic workplaces: a review and some priorities for research. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 6, 127-149.

-
- Helms, E., Schraft, R., & Hagele, M. (2002). rob@work: Robot Assistant in Industrial Environments. *IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, (pp. 399-404). Berlin.
- Herlant, L., Holladay, R., & Srinivasa, S. (2016). Assistive Teleoperation of Robot Arms via Automatic Time-Optimal Mode Switching. *ACM International Conference on Human Robot Interaction*, (pp. 35-42).
- Hoc, J. M. (1998). L'ergonomie cognitive, un compromis entre des approches centrées sur la machine et des approches centrées sur l'homme. *Recherche et Ergonomie*, (pp. 9-19). Toulouse.
- Hoc, J. M. (2001). Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. *International Journal of Human-Computer Studies*(54), 509-540.
- Hoc, J. M. (2004). La gestion de situation dynamique. Dans P. Falzon, *Ergonomie* (pp. 515-530).
- Hollnagel, E., Woods, D. D., & Leveson, N. C. (2006). *Resilience engineering: Concepts and precepts*. Ashgate.
- Iganaki, T. (2003). Automation and the cost of authority. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 169–174.
- INCOSE. (2015). *Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, 4th Edition*. Wiley.
- International Federation of Robotics. (2015). *World Robotics : Industrial Robots*.
- Ishikawa, K. (1968). *Guide to Quality Control*. Tokyo: JUSE.
- ISO 10218-1. (2011). *Robots et dispositifs robotiques -- Exigences de sécurité pour les robots industriels -- Partie 1: Robots*.
- ISO 10218-2. (2011). *Robots et dispositifs robotiques -- Exigences de sécurité pour les robots industriels -- Partie 2: Systèmes robots et intégration*.
- ISO 12100. (2010). *Sécurité des machines -- Principes généraux de conception -- Appréciation du risque et réduction du risque*.
- ISO 9241-210. (2010). *Ergonomie de l'interaction homme-système -- Partie 210: Conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs*.
- ISO 9241-910. (2011). *Ergonomie de l'interaction homme-système -- Partie 910: Cadre pour les interactions tactiles et haptiques*.
- ISO 9283. (1998). *Manipulating industrial robots -- Performance criteria and related test methods*.
- ISO/TR 16982. (2002). *Ergonomics of human-system interaction -- Usability methods supporting human-centred design*.
- ISO/TS 15066. (2016). *Robots and robotic devices -- Collaborative robots*.
- Jackson, M. (1998). *ntre situations de gestion et situations de délibération, l'action de l'ergonome dans les projets industriels (Thèse de doctorat)*. Université Bordeaux 2.
- Jocelyn, S., Bulet-Vienney, D., Giraud, L., & Sghaier, A. (2016). *Robotique collaborative - Evaluation des fonctions de sécurité et retour d'expérience des travailleurs, utilisateurs et intégrateurs au Québec*. IRSST.

- Kaber, D. B., Onal, E., & Endsley, M. R. (2000). Design of Automation for Telerobots and the Effect on Performance, Operator Situation Awareness, and Subjective Workload. (J. W. Sons, Éd.) *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 10(4), 409-430.
- Kahneman, D. (2011). *Thinking, Fast and Slow*. Farrar, Straus and Giroux.
- Karwowski, W., & Rahimi, M. (1991). Worker selection of sage speed and idle condition in simulated monitoring of two industrial robots. *Ergonomics*, 34(5), 531-546.
- Khalid, A., Kirisci, P., Ghrairi, Z., Klaus-Dieter, T., & Pannek, J. (2016). A methodology to develop collaborative robotic cyber physical systems for production environments. *Logistics Research*, 3-23.
- Kirlik, A. (1993). Modeling strategic behavior in human-automation interaction: Why an 'aid' can (and should) go unused. *Human Factors*(35), 221-242.
- Kleinpeter, E. (2015). Le Cobot, la coopération entre l'utilisateur et la machine. *Multitudes*(58), 70-75.
- Kortenkamp, D., Bonasso, P., Ryan, D., & Schreckenghost, D. (1997). Traded Control with Autonomous Robots as Mixed Initiative Interaction. *AAAI Symposium on Mixed Initiative Interaction*, (pp. 89-94).
- Koskinen, J., Heikkilä, T., & Pulkkinen, T. (2009). Monitoring of co-operative assembly tasks: functional, safety and quality aspects. *IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing*, (pp. 310-315).
- Kosuge, K., & Hirata, Y. (2004). Human-Robot Interaction. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, (pp. 8-11).
- Krüger, J., Lien, T., & Verl, A. (2009). Cooperation of human and machines in assembly lines. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(2), 628-646.
- Kruse, T., Pandey, A. K., Alami, R., & Kirsch, A. (2013). Human-aware robot navigation: A survey. *Robotics and Autonomous Systems*, 1726-1743.
- Kulic, D., & Croft, E. (2007). Affective state estimation for human-robot interaction. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(5), 991-1000.
- Lamy, X. (2011). *Conception d'une Interface de Pilotage d'un Cobot (Thèse de doctorat)*. Université Pierre & Marie Curie.
- Lasota, P. A., Rossano, G. F., & Shah, J. A. (2014). Toward Safe Close-Proximity Human-Robot Interaction with Standard Industrial Robots. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, (pp. 339-344).
- Laurent, L. (2015). Les Robots d'assistance physique : utilisations et conséquences santé-travail à l'horizon 2030. *Congrès International de la SELF*, (pp. 568-573).
- Le Bellu, S. (2011). *Capitalisation des savoir-faire et des gestes professionnels dans le milieu industriel*. Université Bordeaux .
- Le Moigne, J. L. (1977). *La théorie du système général*. PUF.
- Lee, J. D., & See, K. A. (2004). Trust in Automation: Design for Appropriate Reliance. *Human Factors*, 46(1), 50-80.

-
- Lee, J. D., & Seppelt, B. D. (2009). Human Factors in Automation Design. Dans S. Y. Nof, *Handbook of Automation* (pp. 417-436). Springer.
- Lee, J., & Moray, N. (1992). Trust and the allocation of function in the control of automatic systems. *Ergonomics*, 35, 1243-1270.
- Leontiev. (1974). The problem of activity in psychology. *Journal of Russian and East European Psychology*, 4(33), 4-33.
- Leplat, J. (2003). La modélisation en ergonomie à travers son histoire. Dans J. C. Sperandio, & M. Wolff, *Formalismes de modélisation pour l'analyse du travail et l'ergonomie* (pp. 1-26). PUF.
- Leplat, J. (2006). La Notion de régulation dans l'analyse de l'activité. *Pistes*, 8(1).
- Licklider. (1960). Man-Computer Symbiosis. *IRE Transactions on Human Factors in Electronics*, 4-11.
- Lini, S. (2013). *L'anticipation et sa représentation dans les interfaces homme-système en aéronautique (Thèse de doctorat)*. Université Bordeaux I.
- Maline, J. (1994). *Simuler le travail, une aide à la conduite de projet*. Lyon: ANACT.
- Mankins, J. C. (1995). *Technology readiness levels, A White Paper*. NASA.
- Marc, E., & Picarc, D. (2002). Interaction. Dans J. Barus-Michel, E. Enriquez, & A. Lévy, *Vocabulaire de la psychosociologie* (pp. 189-196). Erès.
- Marquié, J. C. (1995). Changements cognitifs, contraintes de travail et expériences : les marges de manoeuvre du travailleur vieillissant. Dans J. Marquié, D. Paumès, & S. Volkoff, *Le travail au fil de l'âge* (pp. 211-244). Toulouse: Octarès Editions.
- Matta, N., Ermine, J. L., Aubertin, G., & Trivin, J. Y. (2001). Knowledge Capitalization with a knowledge engineering approach: the Mask method. Dans R. Dieng-Kuntz, & N. Matta, *Knowledge Management and Organizational Memories* (pp. 17-28). Springer.
- Maurice, P. (2015). *Virtual Ergonomics for the design of collaborative robots (Thèse de doctorat)*. Université Pierre et Marie Curie, Paris IV.
- Maurice, P., Schlehuber, P., Padois, V., Bidaud, P., & Measson, Y. (2014). Automatic selection of ergonomic indicators for the design of collaborative robots. *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. Madrid, Spain.
- Mayer, R. C., Davis, J. H., & Schoorman, F. D. (1995). An integrative model of organizational trust. *Academy of Management Review*(20), 709-734.
- Michalos, G., Makris, S., Spiliotopoulos, J., Misios, I., Tsarouchi, P., & Chryssolouris, G. (2014). ROBO-PARTNER: Seamless Human-Robot Cooperation for Intelligent, Flexible and Safe Operations in the Assembly Factories of the Future. *Conference on Assembly Technologies and Systems*, (pp. 71-76).
- Michalos, G., Makris, S., Tsarouchi, P., Guasch, T., Kontovrakis, D., & Chryssolouris, G. (2015). Design considerations for safe human-robot collaborative workplaces. *CIRPe - Understanding the life cycle implications of manufacturing*(37), 248-253.
-

- Michalos, M., Karagiannis, K., Makris, S., Tokçalar, O., & Chryssolouris, G. (2016). Augmented reality applications for supporting human-robot interactive cooperation. *48th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, (pp. 370-375).
- Michon, J. A. (1979). *Dealing with danger, Technical Report*. Verkeerskundig Studiecentrum Rijksuniversiteit Groningen.
- Midler, C. (1998). Evolution des modèles d'organisation et régulation économiques de la conception. *Problèmes économiques*.
- Milgram, P., Rastogi, A., & Grodski, J. (1995). Telerobotic Control Using Augmented Reality. *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, (pp. 21-29).
- Miller, C. A., & Parasuraman, R. (2007). Designing for Flexible Interaction Between Humans and Automation: Delegation Interfaces for Supervisory Control. *Human Factors*, 57-75.
- Millot, P., & Debernard, S. (2007). An Attempt for conceptual framework for Human-Machine Cooperation. *Analysis Design and Evaluation of Human machine Systems*. Seoul.
- Millot, P., Pacaux-Lemoine, M. P., & Trentesaux, D. (2015). Une conception anthropo-centrée pour casser le mythe de l'"Humain Magique" en Génie Industriel ? *Congrès International de Génie Industriel*. Québec, Canada.
- Mittendorfer, P., & Cheng, G. (2011). Humanoid Multimodal Tactile-Sensing Modules. *IEEE Transactions on Robotics*, 27(3).
- Mizen, N. J. (1968, Octobre). Machines with strength. *Science Journal*, 50-55.
- Mori, M. (1970). The uncanny valley. *Energy* 7(4), 33-35.
- Morin, E. (1990). *Introduction à la pensée complexe*. Le Seuil.
- Morinière, B., Verney, A., Abroug, N., Garrec, P., & Perrot, Y. (2015). EMY : a dual arm exoskeleton dedicated to the evaluation of Brain Machine Interface in clinical trials. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (pp. 5333-5338). Hamburg, Germany.
- Moulières-Seban, T., Bitonneau, D., Salotti, J., Thibault, J. F., & Claverie, B. (2016). Human Factors Issues for the Design of a Cobot System. *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. Orlando, FL, USA.
- Moulières-Seban, T., Bitonneau, D., Thibault, J. F., Salotti, J., & Claverie, B. (2016). La Cobotique : un domaine pluridisciplinaire émergent utile à l'ergonome. *Congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française*.
- MRK-Systeme. (2017). *Produkte*. Récupéré sur MRK-Systeme GmbH: <http://www.mrk-systeme.de/produkt/features-safeguiding>
- Murashov, V., Hearl, F., & Howard, J. (2016). Working safely with robot workers: Recommendations for the new workplace. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 61-71.
- Murphy, R. R., & Woods, D. D. (2009). Beyond Asimov: The Three Laws of Responsible Robotics. *IEEE Intelligent Systems*, 14-20.
- NASA. (2007). *Systems engineering handbook NASA/SP-2007-6105*. Washington.

-
- NATO Allied Command Transformation. (2014). *Multinational Capability Development Campaign (MCDC) 2013-2014 Focus Area "Role of Autonomous Systems in Gaining Operational Access"*.
- Neboit, M., & Poyet, C. (1991). La communication homme-machine en robotique : analyse comparée de différentes interfaces de programmation. *Technologies de l'Informatique et Société*, 3(2-3), 231–249.
- NF EN 614-1+A1. (2009). *Sécurité des machines - Principes ergonomiques de conception - Partie 1 : terminologie et principes généraux*.
- NF EN 614-2+A1. (2008). *Sécurité des machines - Principes ergonomiques de conception - Partie 2 : interactions entre la conception des machines et les tâches du travail*.
- NF EN ISO 11064-4. (2014). *Conception ergonomique des centres de commande - Partie 4 : agencement et dimensionnement du poste de travail*.
- NF ISO 8373. (2012). *Robots et composants robotiques - Vocabulaire - Robots manipulateurs industriels*.
- NIAG. (2004). *Pre-feasibility Study on UAV Autonomous Operations*.
- Nielsen, J. (1993). *Usability Engineering*. Morgan Kaufmann.
- Nielsen, J., & Molich, R. (1990). Heuristic evaluation of user interfaces. *ACM CHI'90*. Seattle, WA.
- Nof, S. Y. (1999). *Handbook of Industrial Robotics*. John Wiley & Sons.
- Norman, D. A. (1988). *The Design of Everyday Things*. Basic Books.
- Oberer, S., & Schraft, R. (2007). Robot-Dummy Crash Test for Robot Safety Assessment. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (pp. 2934-2939).
- Oborski, P. (2004). Man-machine interactions in advanced manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 227-232.
- Ochanine, V. A. (1977). Concept of operative image in engineering and general psychology. Dans B. F. Lomov, V. F. Rubakhin, & V. F. Venda, *Engineering Psychology*. Moscou: Science Publisher.
- Ogorodnikova, O. (2008). Human Weaknesses and strengths in collaboration with robots. *Periodica Politechnica*, 52(1), pp. 25-33.
- O'Hara, J. M., & Higgins, J. (2010). *Human system interface to automatic systems Review guidance and technical basis*. Brookhaven National Laboratory.
- Olsen, D. R., & Goodrich, M. A. (2003). Metrics for Evaluating Human-Robot Interaction. *Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop*. NIST.
- OSD Manufacturing Technology Program. (2011). *Manufacturing Readiness Level (MRL) Deskbook*.
- Pacaux, M. P., Debernard, S., Godin, A., Rajaonah, B., Anceaux, F., & Vanderhaegen, F. (2011). Levels of automation and human-machine cooperation: Application to human-robot interaction. *18th IFAC World Congress*, (pp. 6484-6492). Milan (Italie).

- Pan, Z., Polden, J., Larkin, L., Van Duin, S., & Norrish, J. (2012). Recent Progress on Programming Methods for Industrial Robots. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 28(2), 87-94.
- Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse. *Human Factors*, 39(2), 230-253.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). 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.
- Paris, J. C. (2014). *Ingénierie Cognitive pour l'aide à la conduite automobile de la personne âgée (Thèse de doctorat)*. Université de Bordeaux.
- Parlement européen. (2006). *Directive 2006/42/CE du Parlement européen et du Conseil du 17 mai 2006*.
- Pastré, P. (2005). *Apprendre par la simulation : de l'analyse du travail aux apprentissages professionnels*. Octares.
- Pennel, I., Ferrel, C., Coello, Y., & Orliaguet, J. P. (2002). Contrôle sensori-moteur en situation de téléopération : données théoriques et perspectives ergonomiques. *Le travail humain*, vol.65 n°1, 29-58.
- Perilhon, P. (2003). *MOSAR- Présentation de la méthode*. Techniques de l'Ingénieur.
- Peshkin, M., & Colgate, J. E. (1999). Cobots. *Industrial Robot: An International Journal*, vol.26 n°5, 335-341.
- Phillips, E. L. (2010). *The development and initial evaluation of the human readiness level framework (Thesis and Dissertations)*. Monterey, California: Calhoun: The NPS Institutional Archive.
- Pina, P. E., Cummings, M. L., Crandall, J. W., & Della Penna, M. (2008). Identifying generalizable metric classes to evaluate human-robot teams. *Proceedings of the Metrics for Human-Robot Interaction Workshop at the 3rd Annual Conference on Human-Robot Interaction*. Amsterdam.
- Piolain, G., Geffard, F., Coudray, A., Garrec, P., Thro, J.-F., & Perrot, Y. (2010). Dedicated and Standard Industrial Robots used as Force-Feedback Telemaintenance Remote Devices at the AREVA Recycling Plant. *IEEE 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry*.
- Poirot-Mazères, I. (2013). Robotique et médecine : quelle(s) responsabilité(s) ? *Journal International de Bioéthique*, 24, 99-124.
- Ponsa, P., Amante, B., & Diaz, M. (2010, Janvier). Ergonomic design applied in a sugar mill interface. *Latin American Applied Research*, pp. 27-33.
- Ponsa, P., Vilanova, R., Diaz, M., & Goma, A. (2008). A Human Factors Approach to Supervisory Control Interface Improvement. Dans P. Pecherkova, M. Fildr, & J. Dunik, *Robotics, Automation and Control* (pp. 337-352). Vienne, Autriche: I-Tech.
- Proud, R. W., Hart, J. J., & Mrozinski, R. B. (2003). *Methods for Determining the Level of Autonomy to Design into a Human Spaceflight Vehicle: A Function Specific Approach*. NASA Johnson Space Center Report.

- Rahimi, M., & Karwowski, W. (1990). A Research Paradigm in Human-Robot Interaction. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 5, 59-71.
- Ranney, T. A. (1994). Models of driving behaviour: a review of their evolution. *Accident Analysis and Prevention*, 733-750.
- Rasmussen, J. (1979). Human systems design criteria: State of the art and future perspectives. *SOTAC'79*, (pp. 297-309).
- Rasmussen, J. (1983). Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 257-266.
- Rasmussen, J. (1997). Risk management in a dynamic society: a modelling problem. *Safety Science*, 27(2-3), 183-213.
- RB3D. (2014). *Manipulation d'outils*. Récupéré sur RB3D We Multiply your capacity: <http://www.rb3d.com/applications/manipulation-doutils/>
- Reason, J. (1990). *Human error*. Cambridge University.
- Richard, J. F. (1990). *Les activités mentales*. Paris: Armand Colin.
- Robotic Industries Association. (2015, Juillet 7). *Robotics News - How Does the Accident in Germany Affect Industrial Robot Safety?* Récupéré sur RIA - Robotics Online: https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-News/How-Does-the-Accident-in-Germany-Affect-Industrial-Robot-Safety/content_id/5555
- Robotic Industries Association. (2017). *Unimate - The First Industrial Robot*. Récupéré sur RIA - Robotics Online: <https://www.robotics.org/joseph-engelberger/unimate.cfm>
- Roche, A. (2015). *Proposition d'une méthode de conception systémique d'interface homme-système adaptée aux situations de multihandicap (Thèse de doctorat)*. Université de Bordeaux.
- Rogalski, J. (1994). Formation aux activités collectives. *Le travail humain*(57), 425-443.
- Rohmer, E., Singh, P., & Freese, M. (2013). V-REP: a Versatile and Scalable Robot Simulation Framework. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Tokyo.
- Rossi, D., Bertoloni, E., Fenaroli, M., Marciano, F., & Alberti, M. (2013). A multi-criteria ergonomic and performance methodology for evaluating alternatives in “manuable” material handling. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 314-327.
- Roth, E. M., Patterson, E. S., & Mumaw, R. J. (1999). Cognitive Engineering: Issues in User-Centered System Design. Dans J. J. Marciniak, *Encyclopedia of Software Engineering, 2nd Ed*. John Wiley & Sons.
- Rouse, W. B., & Rouse, S. H. (1983). Analysis and Classification of Human Error. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 13(4), 539-549.
- Roy, D., Gerber, G., Magnenat, S., Riedo, F., Chevalier, M., Oudeyer, P., & Mondada, F. (2015). IniRobot : a pedagogical kit to initiate children concepts of robotics and computer science. *6th International Conference on Robotics in Education*. Yverdon-Les-Bains, Switzerland.
- Sadin, S. R., Povinelli, F. P., & Rosen, R. (1989). The NASA technology push towards future space mission systems. *Acta Astronautica*, 20, 73-77.

- Sagar, M. (2001). Méthodologie de re-conception ergonomique d'une salle de contrôle d'une cimenterie. *Comptes rendus du congrès SELF-ACE*, (pp. 94-99). Montréal, Canada.
- Sagot, J., & Gomes, S. (2003). Intégration des facteurs humains dans la démarche de conception. *Hygiène et sécurité au travail*(191), 61-72.
- Sander, M. S., & McCormick, E. J. (1993). *Human Factors in Engineering and Design (7th ed.)*. New York: McGraw-Hill.
- Sausser, B., Ramirez-Marquez, J., Verma, D., & Gove, R. (2006). From TRL to SRL : The Concept of System Readiness Levels. *Conference on Systems Engineering Research*. Los Angeles, CA.
- Scapin, D., & Bastien, J. (1997). Ergonomic criteria for evaluating the ergonomic quality of interactive systems. *Behaviour and Information Technology*, 16(4), 220-231.
- Schmidt, K. (1991). Cooperative Work: a conceptual framework. Dans J. Rasmussen, B. Brehmer, & J. Leplat, *Distributed decision making: Cognitive models for cooperative work* (pp. 75-110).
- Schneider, S., Hegger, F., Hochgeschwender, N., Dwiputra, R., Moriarty, A., Berghofer, J., & Kraetzschmar, G. K. (2015). Design and Development of a Benchmarking Testbed for the Factory of the Future. *IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*.
- Scholtz, J. (2002). *Theory and Evaluation of Human Robot Interactions*. Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'03).
- Scholtz, J., Antonishek, B., & Young, J. (2004). Evaluation of a Human-Robot Interface: Development of a Situational Awareness Methodology. *IEEE 37th International Conference on System Sciences*. Hawaii.
- Schraft, R., Meyer, C., Parlitz, C., & Helms, E. (2005). PowerMate - A Safe and Intuitive Robot Assistant for Handling and Assembly Tasks. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (pp. 4074-4079).
- Schröter, D., Kuhlang, P., Finsterbusch, T., Kuhrke, B., & Verl, A. (2016). Introducing process building blocks for designing human robot interaction work systems and calculating accurate cycle times. *6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems* (pp. 221-216). Elsevier.
- Sheridan, T. B. (1992). *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. MIT Press.
- Sheridan, T. B. (1999). Function allocation: algorithm, alchemy or apostasy? *International Journal of Human-Computer Studies*, 203-216.
- Sheridan, T. B., & Verplank, W. L. (1978). *Human and Computer Control for Undersea Teleoperators*. Cambridge, MA: MIT Man-Machine Laboratory.
- Shi, J., Jimmerson, G., Pearson, T., & Menassa, R. (2012). Levels of human and robot collaboration for automotive manufacturing. *ACM Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems*.
- Shibata, S., & Inooka, H. (1998). Psychological evaluations of robot motions. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 483-494.
- Shneiderman, B. (1986). *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction*. Addison-Wesley.

- Siguiet, F. (2017, Mars 22). Nous, les robots.
- Spath, D., Braun, M., & Bauer, W. (2009). Integrated Human and Automation Systems. Dans S. Y. Nof, *Handbook of Automation* (pp. 574-598). Springer.
- Steinfeld, A., Fong, T., Kaber, D., Lewis, M., Scholtz, J., Schultz, A., & Goodrich, M. (2006). Common Metrics for Human-Robot Interaction. *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, (pp. 33-40). Salt Lake City.
- Stone, J. R. (2000). Haptic feedback: a potted history, from telepresence to virtual reality. *International Workshop on Haptic Human-Computer Interaction*, (pp. 1-16). Glasgow, Scotland.
- Suarez Roos, A. (2016, Mai 25). La cobotique : une opportunité pour la France. (J. Raynal, Intervieweur) Industrie & Technologies.
- Surdilovic, D., & Schreck, G. (2010). Development of Collaborative Robots (COBOTS) for Flexible Human-Integrated Assembly Automation. *ISR Robotik 2010*, (pp. 90-97).
- Sylla, N., Bonnet, V., Venture, G., Armande, N., & Fraise, P. (2014). Assessing neuromuscular mechanisms in human-exoskeleton interaction. *IEEE 36th International Conference of Engineering in Medicine and Biology Society*, (pp. 1210-1213). Chicago, IL, USA.
- Sylla, N., Bonnet, V., Venture, G., Armande, N., & Fraise, P. (2014). Human arm optimal motion analysis in industrial screwing task. *IEEE 5th International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*, (pp. 964-969). São Paulo, Brazil.
- Symop. (2011). *Robotisation – mode d'emploi (Syndicat des entreprises de technologies de production)*. Techniques de l'Ingénieur.
- Tan, J. T., Duan, F., Zhang, Y., Kato, R., & Tamio, A. (2009). Task Modeling Approach to Enhance Man-Machine Collaboration in Cell Production. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (pp. 152-157).
- Taralle, F., Paljic, A., Manitsaris, S., Grenier, J., & Guettier, C. (2015). Is symbolic gestural interaction better for the visual attention? *6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics* (pp. 1060-1065). Elsevier.
- Tassinari, R. (2006). *La pratique de l'analyse fonctionnelle*. Dunod.
- Tellaeche, A., Maurtua, I., & Ibarguren, A. (2015). Human Robot interaction in industrial robotics - Exemples form research centers to industry. *IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*.
- Terveen, L. G. (1995). Overview of human-computer collaboration. *Knowledge-Based Systems*, 8(2), 67-81.
- Thibault, J. F. (1998). Instrumenter les simulations. *Performances n°97*, 14-22.
- Thibault, J. F. (2000). Contribution de l'ergonomie dans les projets de conception et d'implantation d'un Système Digital de Contrôle Distribué (SDCD). *L'Ergonomie dans les projets industriels de processus continu* (pp. 173-186). Rio de Janeiro, Brésil: Lucerna.
- Thibault, J. F. (2017). *Guide pratique d'ergonomie en conception industrielle (Safran)*. Octares.

- Thunberg, A., & Osvalder, A. L. (2007). What Constitutes a Well-Designed Alarm System? *IEEE 8th Human Factors and Power Plants and HPRCT 13th Annual Meeting*, (pp. 85-91). Monterey, CA, USA.
- Tinsley, F. (1961, Décembre). New equipment for tomorrow's brush-war soldiers. *Mechanix Illustrated*.
- Tornil, B. (2006). *Adaptations et Interactions gestuelles et haptiques, ciblées utilisateurs. Vers plus d'utilisabilité et d'accessibilité (Thèse de doctorat)*. Université Toulouse 3.
- Turing, A. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 433-460.
- US Department of Defense. (2010). *U.S. Air Force Human System Integration Handbook*.
- US Department of Defense. (2012). *Task Force Report: The Role of Autonomy in DoD Systems*. Washington: Department of Defense, Defense Science Board.
- Varela, F. (1996). *Invitation aux sciences cognitives*. Points.
- Vicente, K. J. (1999). *Cognitive Work Analysis: Toward Safe, Productive, and Healthy Computer-Based Work*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Walker, I. D. (2016). Snake-Like and Continuum Robots. Dans B. Siciliano, & O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics* (pp. 481-498). Springer.
- Walther, S., & Guhl, T. (2014). *Classification of physical human-robot interaction scenarios to identify relevant requirements*. Conference ISR Robotik.
- Weistroffer, V. (2015). *Étude des conditions d'acceptabilité de la collaboration homme-robot en utilisant la réalité virtuelle (Thèse de doctorat)*. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Weistroffer, V., Paljic, A., Fuch, P., Hugues, O., Chodacki, J., Ligot, P., & Morais, A. (2014). Assessing the Acceptability of Human-Robot Co-Presence on Assembly Lines. *IEEE Internatoinal Symposium on Robot and Human Interactive Communication*. Edinburg, Scotland, UK.
- Whitby, B. (2008). Sometimes It's Hard to Be a Robot. *Interacting with Computers*, 20(3), 326-333.
- Wiener, N. (1948). *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Hermann & Cie.
- Williams, R. (2008). *Autonomous systems overview*. BAE Systems.
- Wollschlaeger, M., Sauter, T., & Jasperneite, J. (2017). The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 17-27.
- Woods, D. D. (1996). Decomposing Automation: Apparent Simplicity, Real Complexity. Dans R. Parasuraman, & M. Mouloua, *Automation and Human Performance: Theory and Applications* (pp. 3-17). Erlbaum.
- Woods, S. N., Walters, M. L., Koay, K. L., & Dautenhahn, K. (2006). Methodological issues in HRI: A comparison of live and video-based methods in robot to human approach direction trials. *IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN)*, (pp. 51-58).

- Yamane, K., Anderson, S., & Hodgins, J. (2010). Controlling Humanoid Robots with Human Motion Data. *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, (pp. 504-510). Nashville, TN, USA.
- Yanco, H. A., & Drury, J. (2004). *Classifying Human-Robot Interaction : An Updated Taxonomy*.
- Zieba, S., Polet, P., Vanderhaegen, F., & Debernard, S. (2010). Principles of adjustable autonomy: a framework for resilient human-machine cooperation. *Cognition, Technology and work*, 12(3), 193-202.
- Zintchenko, P. (1966). Quelques problèmes de psychologie de la mémoire. (E. d. Progrès, Éd.) *Recherches Psychologiques en URSS*.