



HAL
open science

Contribution à la prise en compte des dimensions humaines lors des projets de transformation industrielle - Cas de la cobotique

Mouad Bounouar

► **To cite this version:**

Mouad Bounouar. Contribution à la prise en compte des dimensions humaines lors des projets de transformation industrielle - Cas de la cobotique. Génie des procédés. HESAM Université, 2021. Français. NNT: 2021HESAE055 . tel-03683155

HAL Id: tel-03683155

<https://pastel.hal.science/tel-03683155v1>

Submitted on 31 May 2022

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.

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
[LABORATOIRES : LCFC– Campus de METZ & LISPEN-CAMPUS DE
LILLE]

THÈSE

présentée par : **Mouad BOUNOUAR**

soutenue le : 29/11/2021

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Génie industriel**

Contribution à la prise en compte des dimensions humaines lors des projets de transformation industrielle - Cas de la cobotique

THÈSE dirigée par : Pr. SIADAT Ali

et co-encadrée par : Pr. BEAREE Richard et Mcf. BENCHEKROUN Tahar-Hakim

Jury

M. Jean Claude SAGOT, PU, ELLIADD-ERCOS, UTBM

M. Alain GARRIGOU, PU, INSERM, IUT Bordeaux

Mme. Marie-Pierre PACAUX-LEMOINE, HDR, LAMIH, UPHF

Mme. Hélène CHANAL, MCF, HDR, IFMA, Sigma Clermont

M. Khalifa MANSOURI, PU, SSDIA, Université Hassan II de Casablanca

M. Ali SIADAT, PU, LCFC, Arts et Métiers Campus de Metz

M. Richard BEAREE, PU, LISPEN, Arts et Métiers Campus de Lille

M. Tahar-Hakim BENCHEKROUN, MCF, CRTD-ergonomie, CNAM de Paris

M. Philippe COULON, Président d'Avignon Céramic

Président

Rapporteur

Rapportrice

Examinatrice

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

Invité

**T
H
È
S
E**

Dédicace

*A mon défunt père, je sais que tu étais toujours fier de moi.
C'est à ta mémoire et à ma mère que je dédie ce travail.*

Remerciements

C'est avec un grand plaisir que je réserve ces lignes pour exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à tous ceux qui m'ont soutenu durant la réalisation de cette thèse.

D'abord, cette thèse n'aurait pas été réalisée sans la présence des trois personnes qui m'ont accompagné tout au long de ces trois années. Mes sincères remerciements et ma reconnaissance sont adressés à mes encadrants de thèse.

A Ali SIADAT ; si j'ai commencé cette thèse, c'est grâce à toi. Je n'oublierai jamais ton e-mail m'informant de l'existence de cette opportunité et de son adéquation potentielle avec ma recherche à l'époque. Pour cette opportunité, pour la confiance que tu m'as accordée dès notre 1^{ère} réunion, pour les conseils et l'encadrement tout au long de ces trois années, pour l'accompagnement dans mon projet professionnel, pour tes qualités humaines, Merci.

A Richard BEAREE ; si j'ai pu préparer cette thèse de manière assez confortable et avec le minimum de stress, c'est grâce à la qualité de l'encadrement permanent dont j'ai bénéficié durant mes premiers mois à Lille et à la confiance acquise après avoir réussi à relever les premiers objectifs challengeants lors de la 1^{ère} année de thèse. Pour l'accueil durant la 1^{ère} moitié de thèse, pour la confiance que tu m'as accordée, pour l'écoute et la compréhension, pour la réactivité à mes e-mails, pour le support permanent, Merci.

A Tahar-Hakim BENCHEKROUN ; si j'ai pu relever le défi de pluridisciplinarité et de prise en compte des conditions humaines lors de la préparation de cette thèse en génie industriel, c'est bien grâce à l'encadrement de qualité sur les aspects liés à l'ergonomie dont j'ai bénéficié tout au long de ces trois dernières années de ta part. Pour l'accueil durant mes nombreux déplacements au 41 rue Gay Lussac au 5^{ème} arrondissement de Paris (CNAM), pour la convivialité durant nos déplacements et longs trajets pendant la conduite du 2^{ème} cas d'étude, pour nos nombreuses réunions et journées de travail, pour ton exigence, pour tes encouragements, Merci.

Je tiens à remercier également les membres de mon comité de suivi de thèse, qui ont suivi ce travail dès la fin de la 1^{ère} année. Vos regards externes, vos remarques et vos conseils ont été d'une grande valeur pour ce travail de recherche. Aux professeurs Alain GARRIGOU, Lionel ROUCOULES, et Frédéric VANDERHAEGEN, Merci.

Je tiens à remercier également les membres du jury de thèse d'avoir accepté d'évaluer ce travail :

Merci à Mme. PACAUX LEMOINE Marie-Pierre et M. GARRIGOU Alain d'avoir lu et évalué mon manuscrit de thèse. Merci pour toutes les remarques et propositions constructives.

Merci à M. SAGOT Jean Claude, Mme. Hélène CHANAL, M. MANSOURI Khalifa et M. COULON Philippe pour toutes les remarques et propositions constructives.

Je tiens à remercier également des personnes que j'ai eu l'occasion de rencontrer durant des moments de cette thèse :

- A mes collègues du projet HECTOR (Anne-Cécile, Marco, Flore, Willy, Caroline, Céline, Gérard, ...), Merci pour nos échanges bénéfiques, pour le croisement de nos points de vue et pour la co-élaboration de certaines valorisations scientifiques ensemble.
- A KLEMENT Nathalie, maître de conférence à L'ENSAM de Lille et FLORIT Adrien, ingénieur de recherche au LISPEN de Lille, merci pour votre disponibilité et pour vos contributions à mon 1^{er} cas d'étude.
- Aux membres de direction et de l'atelier finition de notre 2^{ème} partenaire industriel, qui nous ont accueillis tout au long de notre collaboration. Pour l'ouverture industrielle que vous avez apportée à ce travail de recherche, pour votre chaleureux accueil, pour nos échanges, pour votre disponibilité, pour votre confiance, Merci.

J'ai une pensée également pour tous les doctorants des laboratoires LISPEN-Lille, LCFC-Metz, CRTD-CNAM que j'ai croisés durant ces trois années, ou avec qui j'ai partagé de beaux moments. Je vous souhaite le meilleur pour vos carrières professionnelles.

A ma mère, mes sœurs et mon frère, je ne pourrai jamais vous remercier assez pour le support et amour inconditionnels.

Je remercie également les chercheurs qui m'ont précédé, qui ont mené des réflexions ou qui ont développé des contributions en lien avec des parties de ce sujet de thèse. Vos travaux, cités dans la partie bibliographie de ce manuscrit de thèse, ont nourri ce travail de recherche et nous ont permis de le construire sur de solides bases scientifiques.

Je clôture cette partie avec l'espoir que ce travail de recherche servira aux industriels intéressés par la cobotique, et aux chercheurs qui développeront dans les années et siècles à venir des contributions adaptées aux enjeux technologiques, industriels et sociétaux de leurs époques.

Table des matières

Dédicace	I
Remerciements	II
Table des matières	IV
Liste des tableaux	VI
Liste des figures	VII
Introduction générale : Contexte et cadrage du sujet de thèse	1
Chapitre 1 De la robotique à la cobotique	5
Introduction	5
1. De l'automatisation à l'assistance : Historique et état des lieux de la robotique industrielle	6
2. La notion de collaboration Humains-Robots	16
Conclusion.....	18
Chapitre 2 Propositions méthodologiques : Vers une prise en compte des Humains durant les processus de conception et d'évaluation des systèmes humains-robots.....	19
Introduction	19
1. Etat des lieux des démarches de prise en compte des humains durant la conception des systèmes Humains-machines.....	20
1.1 La Conception centrée sur l'utilisateur	20
1.2 Le Design Thinking.....	22
1.3 La Conception centrée sur l'activité – L'ergonomie	23
1.4 Modèles de conception centrés sur l'utilisateur.....	24
2. Etat des lieux des indicateurs et démarches d'évaluation des systèmes Humains-Robots	
2.1 Critères biomécaniques et physiologiques	32
2.2 L'Acceptabilité d'une nouvelle technologie	33
2.3 L'Utilisabilité d'une nouvelle technologie.....	34
2.4 Synthèse et comparaison des méthodologies présentées.....	35
3. Proposition méthodologique 1 : Vers un cadre méthodologique de conception des systèmes Humains-Robots	37
4. Proposition méthodologique 2 : Vers une approche ergonomique d'analyse du travail dans une perspective de cobotisation	40
5. Proposition méthodologique 3 : Vers une méthodologie d'évaluation des solutions cobotiques.....	41
5.1 L'évaluation des scénarios et pistes de solution.....	42
5.2 L'évaluation finale des solutions de systèmes cobotiques	42

Conclusion.....	44
Chapitre 3 Cas d'étude d'assistance d'un poste de recyclage des boites	45
Introduction	45
1. Cadre et objectif du cas d'étude	46
2. Illustration de la proposition méthodologique par le cas d'étude : Déroulement et résultats.....	47
2.1. Analyse et modélisation des opérations gestuelles visées par le projet	47
2.2. Construction collective et évaluation de scénarios de cobotisation	49
2.3. Étude de faisabilité technologique	50
2.4. Simulation fonctionnelle et analyse des risques.....	51
2.5. Prototypage industriel	52
2.6. Test et évaluation des solutions.....	55
3. Discussion des résultats et perspectives	56
Conclusion.....	58
Chapitre 4 Cas d'étude d'assistance des postes de finition	59
Introduction	59
1. Contexte et objectif du cas d'étude	60
2. Déroulement et résultats d'analyse et de modélisation des activités de finition.....	61
2.1. Analyse stratégique du projet	61
2.2. Analyse et modélisation des activités de finition visées par le projet de cobotisation	
2.3. Analyse systématique des opérations de finition : les enjeux de qualité et de santé	
2.4. Construction collective et évaluation du scénario de cobotisation	75
2.5. Étude de faisabilité technologique	77
3. Discussion des résultats et perspectives	81
Conclusion.....	82
Discussion générale.....	83
1. Les enjeux de sécurité et de performance des systèmes humains-robots.....	85
2. La transformation du travail par la robotique collaborative.....	87
3. Les nouvelles technologies et le sens du travail.....	88
4. La conduite de projet pluridisciplinaire : Apports et difficultés	89
Conclusion générale et perspectives.....	90
Annexes :.....	93
Valorisations scientifiques et académiques.....	97
Bibliographie.....	99
Résumé	107
Résumé en anglais	107

Liste des tableaux

Tableau 1. Comparison of the definitions for collaborative robotics in ISO 8373 versions, current (left) and revision draft (right). The definitions in the draft version are subject to change. (Vicentini, 2020)	10
Tableau 2. Tableau de synthèse des méthodologies et approches discutées	36
Tableau 3. Proposition d'échelle d'hiérarchisation des principes de solutions cobotiques	42
Tableau 4. Proposition d'échelle pour recueillir le ressenti subjectif des futurs utilisateurs ..	43
Tableau 5. 1ère proposition d'allocation des tâches entre humain-robot.....	50
Tableau 6. 2ème proposition d'allocation de tâches homme-robot	54
Tableau 7. Mesure de la productivité des solutions testées	56
Tableau 8. Estimation de l'ICS des solutions testées.....	57
Tableau 9. Caractéristiques des échantillons analysés	66
Tableau 10. Tableau récapitulatif des patterns relevés des 4 opérateurs observés	75
Tableau 11. Récapitulatif des mobilisations actuelles et futures-potentielles de la main gauche	
Tableau 12. Tableau récapitulatif des fonctions attendues du système d'assistance.....	77
Tableau 13. Récapitulatif de la veille technologique réalisée.....	78
Tableau 14. Tableau comparatif : Fonctions attendues VS Pistes technologiques	79
Tableau 15. Vers une spécification fonctionnelle du système d'assistance	81
Tableau 16. Synthèse des apports des contributions méthodologiques développées.....	83
Tableau 17. Synthèse des limites des contributions méthodologiques développées	84

Liste des figures

Figure 1. Schématisation du contexte, de la problématique, des contributions et des cas d'étude de la thèse de doctorat	4
Figure 2. A-Patente “ Programmed transfer article” & B-Premier Robot Unimation	6
Figure 3. Le 1er robot industriel entièrement électrique commandé par micro-ordinateur	7
Figure 4. Les principaux types de robot industriel	8
Figure 5. Exemples de bras robotisés mobiles	9
Figure 6. Dessin industriel du principe de solution du COpliant roBOT	10
Figure 7. Mesures de prévention des risques- cas de la cobotique (Normes de sécurité)	12
Figure 8. Extrait des limites Biomécaniques (ISO TS 15066)	13
Figure 9. Proposition de classification de la robotique industrielle (Bounouar et al., 2019) ..	14
Figure 10. Exemple de solution robotique pour une opération de palettisation	14
Figure 11. Exemple de solution cobotique en utilisant un bras manipulateur.....	15
Figure 12. Exemple d'application robotique collaborative "Take and Place"	15
Figure. 13 Interdépendance des étapes de conception centrée sur l'utilisateur	21
Figure 14. Les 5 étapes du Design Thinking	22
Figure. 15 Modèle en cascade du développement de logiciels (Boehm, 1981)	25
Figure. 16 Modèle en V adapté par Coutaz (1987)	25
Figure. 17 Modèle en spirale de Boehm (1984)	26
Figure. 18 Cycle de conception des interfaces utilisateur Hartson et Boehm-Davis (1993)...	27
Figure 19. Phase descendante (adaptée par Kolski 1995 de Millot et Roussillon, 1991)	28
Figure 20. Phase ascendante d'évaluation (Millot et Roussillon, 1991).....	29
Figure 21. Processus de conception traduisant l'articulation ergonomie-conception.....	30
Figure. 22 Modèle en étoile de Hix (1995)	30
Figure. 23 Vue d'ensemble de l'activité de forage réalisée sans aide et avec l'aide de deux robots collaboratifs différents. Les sphères colorées représentent le niveau d'effort instantané Maurice et al. (2017)	32
Figure. 24 Echelle SUS par Brooke (2013).....	34
Figure 25. Proposition de cadre méthodologique de conduite des processus de conception des systèmes cobotiques (intégrant des étapes visant la prise en compte des dimensions humaines : les étapes colorées en bleu).....	39

Figure 26. Approche ergonomique d'analyse du travail dans une perspective de cobotisation..	
Figure 27. Photo des boîtes à recycler.....	46
Figure 28. Image du poste de travail aux conditions du laboratoire	47
Figure 29. L'organisation spatiale des opérations de recyclage	48
Figure 30. La variété des gestes appliqués pour l'ouverture des boîtes.....	48
Figure 31. L'outil conçu pour ouvrir les boîtes	49
Figure 32. Pièces mécaniques conçues pour améliorer la solution	51
Figure 33. Simulation de la solution développée à l'aide du logiciel V-REP	51
Figure 34. Images du premier prototype industriel développé.....	53
Figure 35. Images du deuxième prototype cobotique développé	55
Figure 36. Schéma du processus de fabrication des pièces concernées par le projet.....	60
Figure 37. Caractérisation des opérations de finition des noyaux céramiques	64
Figure 38. Les observables suivis durant l'analyse systématique des gestes de finition	66
Figure 39. 1ère Chronique (opérateur A) d'analyse des opérations de finition.....	67
Figure 40. Actions de la main gauche, opérateur A	68
Figure 41. Actions de la main droite, opérateur A	68
Figure 42. Interaction de l'opérateur A avec les outils du poste de travail.....	69
Figure 43. 2 ^{ème} Chronique (opérateur B) d'analyse des opérations de finition.....	70
Figure 44. Actions de la main droite, opérateur B	71
Figure 45. Actions de la main gauche, opérateur B	71
Figure 46. Graphe interaction avec les outils du poste de travail, opérateur B.....	72
Figure 47. 4ème Chronique (opérateur D) d'analyse des opérations de finition	73
Figure 48. Patterns de la main gauche, opérateur A.....	74
Figure 49. Patterns de la main droite, opérateur B	74
Figure 50. Patterns de la main GAUCHE, Opérateur D	75
Figure 51. Exemple d'effecteur à base d'adhésion de la société SCHUNK	80
Figure 52. Illustration des axes de discussion	85
Figure 53. Illustration de la perspective d'amélioration du cadre méthodologique de conduite du processus de conception	91

Introduction générale : Contexte et cadrage du sujet de thèse

La robotique a connu des évolutions diverses et rapides. En moins d'un demi-siècle ce domaine a traversé différents niveaux d'évolution (Hägele et al., 2016 ; Vicentini, 2020), transformant ainsi le travail et impactant de plus en plus la place de l'opérateur humain dans les systèmes de production. Passant d'une époque où l'intégration d'un robot signifiait une automatisation complète, désormais une robotisation n'implique pas forcément une suppression de l'activité humaine, car des nouvelles générations de robots dits 'collaboratifs' sont apparues. Grâce à leurs mesures de sécurité intrinsèques (capteurs de couple par exemple), ces robots collaboratifs, appelés aussi cobots, peuvent partager le même espace de travail, ainsi qu'un ensemble de tâches avec les opérateurs (Safeea et al., 2019).

Dernièrement, ces cobots ont acquis une importance particulière en milieu industriel. Grâce à leur petite taille et la facilité relative de leur reprogrammation, ils sont présentés comme une clé de modernisation et de compétitivité des entreprises d'une manière générale, et de croissance et survie des PME en particulier, en combinant le savoir-faire et le pouvoir décisionnel de l'être humain avec la force, l'endurance et la précision du robot. Cette combinaison est présentée comme une solution potentielle pour répondre aux besoins de flexibilité et d'agilité liées à la variabilité de production et à la mondialisation de la concurrence en offrant des nouvelles possibilités d'assistance pour des tâches parfois difficilement automatisables, tout en contribuant également à l'amélioration des conditions de travail.

Comme la majorité des nouveaux dispositifs technologiques, les cobots donnent lieu à un débat autour d'un ensemble de questions, englobant la sécurité des futurs utilisateurs (INRS, 2018), la rentabilité des investissements et leurs impacts sur la performance (Cherubini et al., 2016) et sur les conditions de travail des opérateurs humains (Haeflinger, 2017).

En effet, même si l'amélioration des conditions de travail et la réduction des troubles musculosquelettiques¹ sont parmi les principales promesses liées à la cobotique industrielle, les risques et difficultés causés par l'utilisation des exosquelettes² sont sujets de beaucoup de discussions (Theurel et al., 2018). De même pour la rentabilité, la dégradation de production après la mise en place de robots collaboratifs a été mentionnée lors de plusieurs cas d'étude industriels (Jocelyn et al., 2017).

¹ Les troubles musculo-squelettiques (TMS) recouvrent un large ensemble d'affections de l'appareil locomoteur, pouvant être provoquées ou aggravées par l'activité professionnelle. Ils se traduisent principalement par des douleurs et une gêne fonctionnelle quotidiennes.

² Moyens d'aide à la manutention portés par les utilisateurs faisant partie de la famille cobotique.

De par la multiplicité de ces enjeux, la conception des systèmes cobotiques est une excellente opportunité de discuter l'aspect multi-enjeux lié à la transformation de l'industrie et l'introduction des nouvelles technologies dans les systèmes de production, et de croiser les points de vue et les méthodologies issues de domaines complémentaires (sciences de l'ingénieur, ergonomie, sciences sociales, etc.) pour une meilleure prise en compte de cet aspect multi-enjeux. S'inscrivant dans ce cadre, le projet de recherche ANR HECTTOR³ (l'Humain Engagé par la Cobotisation dans les Transformations du Travail et des ORganisations dans les usines du futur), alliant sciences humaines et sociales (ergonomie : CRTD CNAM Paris, sociologie et anthropologie : CETCOPRA Université Paris 1) et sciences de l'ingénieur (génie industriel et cobotique : LCFC et LISPEN d'Arts et Métiers ParisTech), a pour objectif de comprendre les mutations des organisations industrielles :

- Au niveau sociétal : à travers un diagnostic politique, social et technique ; il s'agit du premier axe de recherche du projet HECTTOR (Saraceno, 2020) ;
- De manière située : à partir d'une analyse des expériences réelles de projets de cobotisation dans des PME ; c'est le 2^{ème} axe de recherche du projet (Lafeuillade et al., 2020) ;

et d'accompagner ces mutations :

- Aux niveaux tactique et opérationnel : à travers l'élaboration d'outils d'aide à la conduite des processus de conception intégrant les enjeux humains et organisationnels durant ces projets de transformation englobant des cobots ; il s'agit du 3^{ème} axe du projet HECTTOR et de l'objectif de cette thèse de doctorat en génie industriel, et qui intègre de façon rigoureuse les enjeux et savoirs de l'ergonomie et de la cobotique.

Au-delà de l'étude de faisabilité technique de la collaboration humains-robots, ce sujet de thèse vise à favoriser une transformation industrielle prenant en compte l'ensemble des enjeux liés à la cobotique (sécurité, performance, facteurs organisationnels et humains), en mettant à disposition des acteurs de conduite des projets de transformation des outils d'aide à la conception prenant en compte ces différents enjeux. La problématique de cette thèse peut être formulée de la manière suivante : **Comment allier sécurité, performance et prise en compte effective des enjeux humains et organisationnels durant les projets de conception des systèmes cobotiques ?**

Pour traiter cette problématique, 4 principaux verrous scientifiques doivent être levés :

- Tout d'abord, la notion de « collaboration » entre humains et robots dans le cadre des systèmes cobotiques doit être clarifiée et explicitée. Ceci permettra de comprendre les possibilités d'usage de ces nouveaux moyens technologiques, en prenant en compte à la fois les contraintes normatives et l'avancement du développement technologique de la robotique collaborative ;
- Ensuite, la conduite des projets de conception représente le facteur central à cibler pour une meilleure prise en compte des facteurs humains et organisationnels dans le cadre de la conception des systèmes cobotiques ;

³ Lien vers la page du projet HECTTOR : <https://anr.fr/Projet-ANR-17-CE10-0011>

- Puis, l'analyse des systèmes existants dans une perspective de cobotisation doit être accompagnée et outillée. Il s'agit d'un moment stratégique durant le processus de conception pour favoriser une cobotisation qui cible les tâches pénibles ou à faible valeur ajoutée ;
- Enfin, les étapes d'évaluation des solutions potentielles de systèmes cobotiques, en particulier des dimensions humaines et organisationnelles doivent être outillées. En effet, si la performance et la sécurité sont souvent prises en compte durant les projets de conception, les dimensions humaines et organisationnelles ne sont pas explicitées et leurs définitions sont très subjectives.

Pour participer à lever ces verrous scientifiques, trois contributions principales ont été développées durant la préparation de cette thèse de doctorat :

- Tout d'abord, un cadre méthodologique de conduite des projets cobotiques. Il vise à orienter les équipes de conception des systèmes cobotiques afin de passer par un processus de conception itératif, participatif, prenant en compte le travail réel et favorisant l'acceptabilité du futur système co-construit avec les différentes parties prenantes du projet ;
- Ensuite, une approche ergonomique d'analyse du travail actuel dans une perspective de cobotisation. Elle vise à permettre à l'équipe de conception de comprendre la valeur du travail humain pour gérer la variabilité industrielle au quotidien et identifier les tâches à viser en priorité par l'éventuel système cobotique ;
- Enfin, une méthodologie d'évaluation des futurs systèmes englobant des indicateurs humains, économiques et industriels.

Ces contributions ont été mises en pratique dans le cadre de deux cas d'étude industriels. De complexité différentes, ces cas d'étude sont complémentaires :

- Le 1^{er}, visant à assister une opération de recyclage de boîtes contenant un produit de nettoyage, a été déroulé en conditions de laboratoire, et a permis de mettre en pratique la 1^{ère} et la 3^{ème} contribution ;
- Le 2^{ème}, déroulé en contexte industriel, il vise à assister des postes de finition manuelle de pièces mécaniques fragiles destinées au secteur aéronautique. Il a permis de mettre en pratique la 2^{ème} contribution.

La Figure 1 schématise le contexte, la problématique, les contributions et les cas d'étude de cette thèse de doctorat.

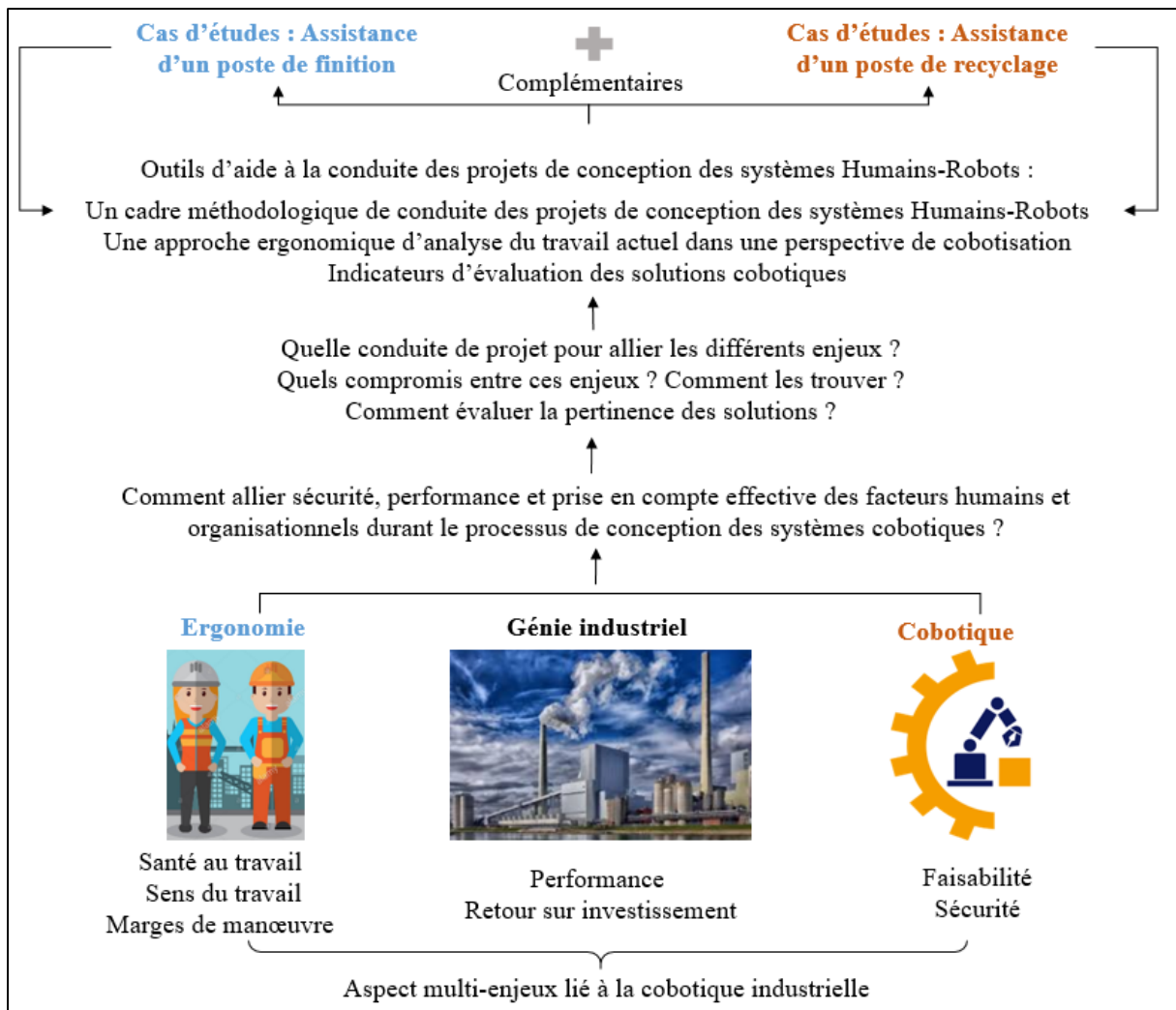


Figure 1. Schématisation du contexte, de la problématique, des contributions et des cas d'étude de la thèse de doctorat

Le présent manuscrit de thèse synthétise les travaux réalisés durant ces trois années de recherche. Il est organisé en quatre chapitres. Tout d'abord, le 1^{er} chapitre discute de l'émergence de la cobotique industrielle. D'une part, en décrivant les avancées technologiques qui ont conduit à l'évolution de la robotique industrielle et qui ont conduit à l'émergence de la cobotique. D'autre part, en discutant des notions d'interaction, de coopération et de collaboration entre humains et machines. Puis, le 2^e chapitre dresse un état de l'art des méthodologies de conception centrées sur l'humain, et présente les contributions méthodologiques de cette thèse. Ensuite, le 3^e et 4^e chapitres présentent respectivement le cas d'étude d'assistance du poste de recyclage des boîtes et le cas d'étude d'assistance des postes de finition. Enfin, en se basant sur les deux cas d'étude et sur cette expérience de recherche, nous discutons dans la section « discussion générale » des thématiques les plus importantes rencontrées durant cette expérience de recherche, à savoir les enjeux de performance et de sécurité des systèmes humains-cobots, la transformation du travail par la robotique collaborative, l'impact des nouvelles technologies sur le sens du travail, et les difficultés et apports d'une conduite de projet pluridisciplinaire.

Chapitre 1

De la robotique à la cobotique

Introduction

La robotique a connu des évolutions diverses et rapides. Passant d'une époque où l'intégration d'un robot signifiait une automatisation, désormais, une robotisation n'implique pas forcément une automatisation, car une nouvelle typologie de robots dits 'collaboratifs' est apparue. Ces robots qui peuvent partager le même espace de travail avec les opérateurs et interagir avec eux donnent lieu à un débat sur la nature de cette interaction : s'agit-il d'une coopération, d'une collaboration ou d'une simple coexistence ? Et ces robots « collaboratifs », sont-ils vraiment collaboratifs ? Pourquoi ces technologies gagnent-elles tant d'intérêts dans le monde industriel ? Qu'en est-il du niveau de leur mise en place en contexte industriel ?

Pour participer à répondre à ces questions, nous proposons dans ce premier chapitre des éclaircissements centrés sur la technologie et ces scénarios d'exploitation. D'une part, nous commençons cette partie par une brève présentation de l'histoire de la robotique industrielle. Ensuite, nous discutons l'émergence de la robotique dite « collaborative ». Nous présenterons par la suite notre proposition de classification de la robotique industrielle, cette proposition est expliquée à travers des exemples de scénarios d'interaction Humains-Robots. D'autre part, nous discuterons les notions de collaboration entre humains et cobots à travers une comparaison de ces notions dans le contexte humain (participants humains) avec les niveaux et les perspectives d'évolution des cobots industriels.

1. De l'automatisation à l'assistance : Historique et état des lieux de la robotique industrielle

1.1. Histoire de la robotique industrielle

En 1956, la rencontre de George Devol, qui deux ans plus tôt avait écrit un brevet sur une machine appelée "Programmed Transfer Article" (Figure 2), avec Joseph Engelberger, un ingénieur de l'industrie spatiale très passionné par la science-fiction, a abouti à la création de la société Unimation, au développement du robot Unimate et à la naissance de l'industrie robotique industrielle. (Westerlund, 2000)

Ils ont d'abord visité 15 usines automobiles et une vingtaine d'autres industries pour mieux comprendre les besoins en matière de robots industriels. Puis, le prototype est arrivé en 1961, et le premier robot a été installé dans l'usine de General Motor (GM) à Trenton pour servir une machine de moulage sous pression (Figure 3). Il était capable de manipuler des objets avec des actionneurs hydrauliques. La durée de vie prévue était de 18 mois, et comme GM voulait pouvoir rembourser le robot en 18 mois, il a été vendu pour 18 000 \$, mais produit pour 65 000 \$. Unimation l'a vendu à bas prix parce qu'il a servi d'objet de référence. Pour augmenter encore plus la demande en robots, Unimation a décidé de louer les machines dans un premier temps. (Wallén, 2008)

La plupart des Unimate à commande hydraulique ont été vendus au cours des années suivantes pour la manipulation des pièces et le soudage par points des carrosseries de voitures (Westerlund, 2000). Peu après, de nombreuses autres entreprises ont commencé le développement et la fabrication des robots industriels dans de nombreux pays (Hunt, 1983). Le premier symposium international sur la robotique industrielle (aujourd'hui ISR) a eu lieu à Chicago en 1970 et a prouvé que la robotique était devenue le domaine d'activité d'une communauté de recherche dynamique (Hägele, 2016).

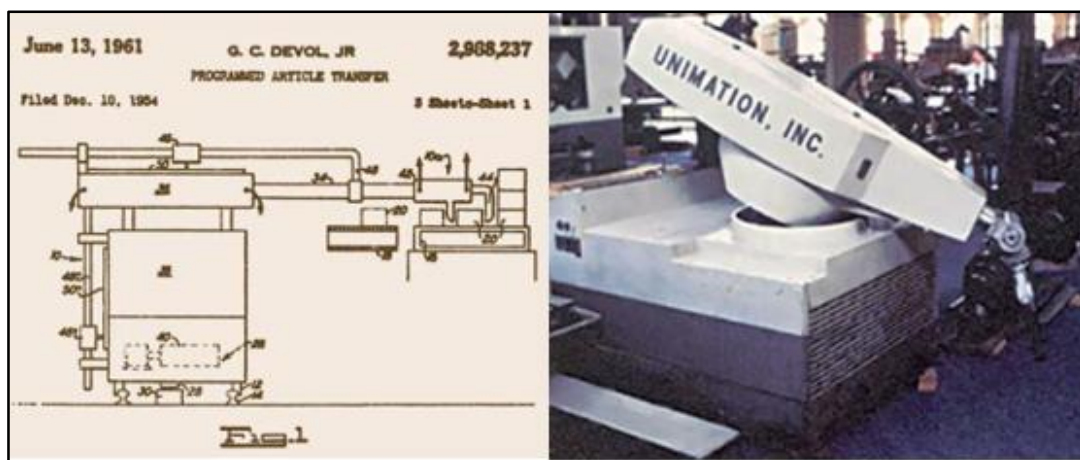


Figure 2. A-Patente "Programmed transfer article" & B-Premier Robot Unimation

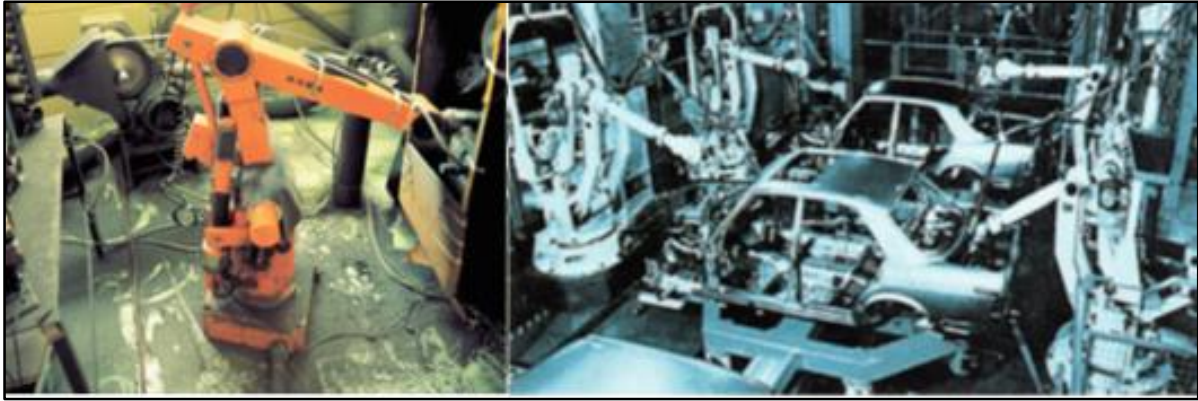


Figure 3. Le 1er robot industriel entièrement électrique commandé par micro-ordinateur

Dans les années 70, plusieurs entreprises se lancent dans le design et la fabrication de robots industriels. En 1973, KUKA (une entreprise allemande) crée le Famulus, le 1^{er} robot industriel avec 6 axes contrôlés électro-mécaniquement. Des mois plus tard, la société ASEA (aujourd'hui ABB) a lancé un robot industriel entièrement électrique commandé par micro-ordinateur, l'IRB-6 (Figure 3), qui permettait un mouvement de trajectoire continue, condition essentielle pour de nombreuses applications telles que le soudage à l'arc ou l'enlèvement de matière (Hägele, 2016). Il pouvait manipuler une charge de 6 kg. Pour répondre aux besoins de l'industrie automobile, une deuxième version nommée IRB-60 avec une charge maximale de 60 kg a été développée deux ans plus tard. Cette intense diffusion des robots durant les années 70 dans la construction automobile s'est surtout concentrée sur les applications de soudage par points et de manutention (Figure 3).

Les années 80 ont été marquées par une croissance accélérée de l'industrie robotique avec une nouvelle entreprise ou un nouveau robot qui voient le jour chaque mois. Dans ce sens, Takeo Kanade a construit en 1981 le premier robot muni de moteurs installés directement aux articulations du bras. Ce qui a permis le développement de robots plus rapides et plus précis. Les années suivantes ont vu de nombreuses améliorations et des robots de plus en plus rapides, précis et flexibles. En 1998, par exemple, les systèmes de contrôle pouvaient gérer jusqu'à 27 axes et synchroniser le contrôle de 4 robots.

Cette évolution robotique a donné lieu à un grand panel de modèles technologiques de robots industriels. Dans cette diversité de propositions technologiques, on peut distinguer les principaux 4 types de robots en Figure 4 (Moulières-Seban, 2017). Le robot articulé sériel, appelé également « bras manipulateur » en raison de sa ressemblance à un bras humain. Sa structure est composée d'une épaule, d'un coude et d'un poignet, reliés par des segments, et d'un outil placé à son extrémité. Cet outil, appelé « effecteur », constitue la spécificité de la cellule robotique.

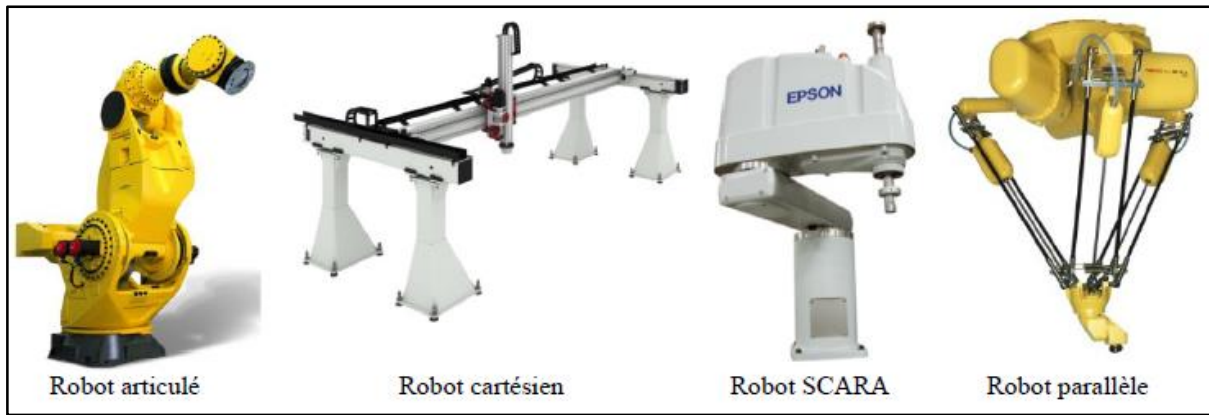


Figure 4. Les principaux types de robot industriel

Proche du précédent, le type SCARA 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 par exemple.

Ces architectures de robot (robot articulé et SCARA) sont sérielles, les segments sont disposés les uns à la suite d-es autres, reliés par des articulations. Il existe d'autres types de structures de robots industriels. Par exemple, 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 nécessitant de la précision et très peu de variabilité.

Les robots cartésiens ont également des structures non-sérielles, ils permettent un déplacement dans l'espace à l'aide d'axes de translation. Ils sont souvent utilisés dans des entrepôts, pour la manutention de cartons par exemple.

Parallèlement au développement des robots industriels, les véhicules à guidage automatique (VGA) ont vu le jour. Très tôt, des combinaisons de VGA et de bras robotisés ont été proposées pour déplacer des pièces ou charger des équipements en suivant une trajectoire prédéterminée (Figure 5). Au départ, les VGA s'appuyaient sur des sols préparés tels que des fils, des aimants ou d'autres étiquettes encastrées pour le guidage des mouvements. Entre-temps, les VGA naviguant librement sur des trajectoires virtuelles font leur entrée dans la fabrication et la logistique à grande échelle. La sécurité et l'alimentation électrique ont été parmi les principales obstacles limitant la diffusion de ces systèmes dans la pratique industrielle. (Bogh et al., 2012)

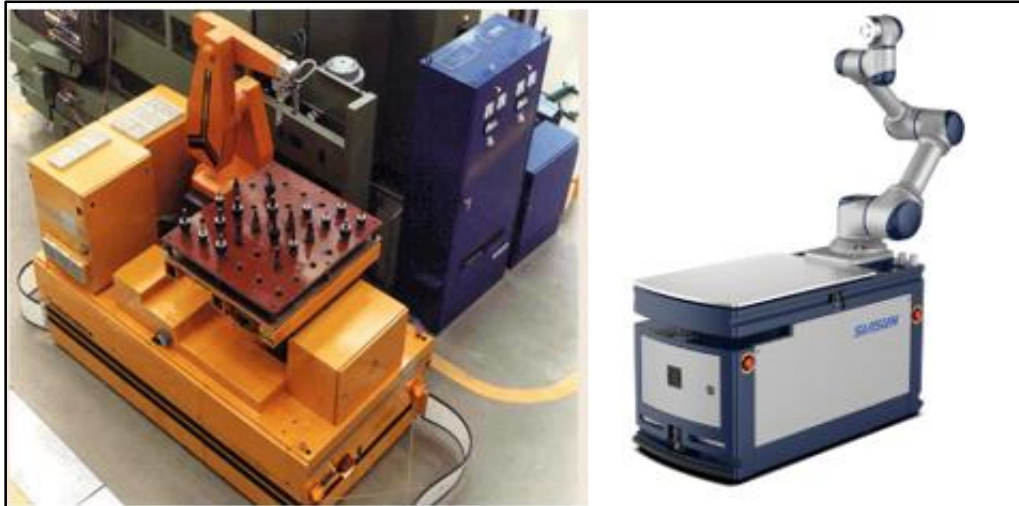


Figure 5. Exemples de bras robotisés mobiles

Pour encadrer la mise en place des robots en milieu industriel et préserver la santé des utilisateurs, plusieurs normes ISO⁴ ont été publiées (ISO 8373, ISO 10218-2, ISO/TS 15066). On retrouve dans la norme ISO 8373-2012, fournissant le vocabulaire des robots et composants robotiques, la définition précisément encadrée du « robot industriel » : il s'agit "d'un manipulateur, multi-application, reprogrammable, commandé automatiquement, programmable sur trois axes ou plus, qui peut être fixé sur place ou mobile, destiné à être utilisé dans des applications d'automatisation industrielle".

1.2. Emergence de la robotique collaborative/cobotique

Si la définition du robot industriel est précise et bien encadrée dans la communauté robotique, les notions de cobot et robot collaboratif, fréquemment utilisées lorsqu'on parle d'Industrie du Futur⁵, le sont moins. Au début de l'année 2015, le ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique français place la cobotique comme le 10e des 47 points des « Technologies clés 2020 », sous la désignation « Cobotique et Humain Augmenté » (Direction générale des entreprises, 2015).

Si on remonte un peu dans le temps, on trouve que la définition originale du mot "cobot" désignait les dispositifs mécaniquement complants⁶ (COMpliant roBOT), destinés à être utilisés dans le cadre d'interfaces haptiques. Ces dispositifs de recherche, brevetés (Colgate and Peshkin, 1999), étaient basés sur une solution mécanique se composant de trois rotations conjointes couplées aux rouleaux d'entraînement de trois transmissions à variation continue (Figure 6) (Vicentini, 2020).

⁴ ISO: International Standard Organization

⁵ <http://www.industrie-dufutur.org/>

⁶ La compliance en robotique désigne la capacité d'un manipulateur à avoir un comportement souple

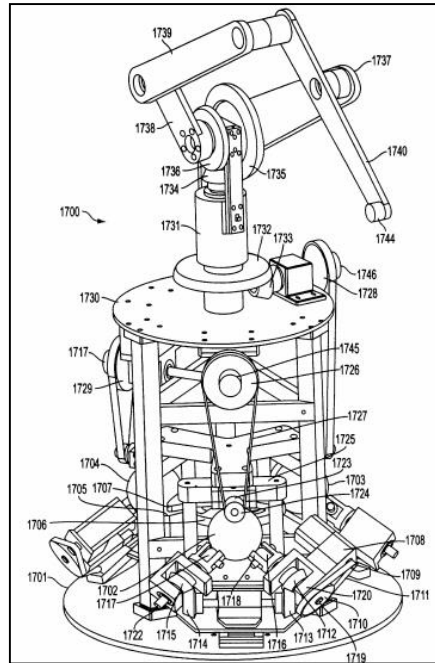


Figure 6. Dessin industriel du principe de solution du COpliant roBOT (Colgate and Peshkin, 1999)

Plus tard, le terme "cobot" a été utilisé par les industriels et les fabricants de robots pour désigner un nouveau type de robot ayant des 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 la présence de l'homme ou éviter des collisions avec lui (Moulières-Seban, 2017). Le mot "cobot" a pris ainsi le nouveau sens de « Collaborative-roBOT », désignant des robots collaboratifs ou encore coopératifs de par leur capacité à partager un même espace de travail commun avec les opérateurs humains.

La nature du terme "collaboratif" a suscité des débats et discussions impliquant un ensemble d'acteurs de plusieurs domaines en lien avec la technologie, le travail et l'industrie d'une manière générale. Ces discussions se reflètent dans les normes sur le vocabulaire, comme la norme ISO 8373 : 2012 qui est en cours de révision, car certaines définitions sont assez dépassées (Vicentini, 2020) ; le tableau 1 montre l'évolution probable des termes : "opération collaborative" et "robot collaboratif".

	ISO 8373:2012	draft of 8373
Collaborative operation	State in which purposely designed robots work in direct cooperation with a human within a defined workspace	State in which a purposely designed robot system and operator(s) work within shared space
Collaborative robot	Robot designed for direct interaction with a human	-

Tableau 1. Comparison of the definitions for collaborative robotics in ISO 8373 versions, current (left) and revision draft (right). The definitions in the draft version are subject to change. (Vicentini, 2020)

Bien que la motivation originale de Colgate et Peshkin [Colgate and Peshkin, 1999 ; Colgate et al., 1996] pour la compliance dans l'interaction Humain-robot soit commune à la robotique collaborative, le terme le plus récent de "cobot" (COLlaborative-roBOT) ne doit pas être simplement étendu à toutes sortes de dispositifs utilisés dans une application collaborative sans plus de clarification et de distinction. Contrairement aux cobots de Colgate et Peshkin qui portent le nom d'un mécanisme réel (Colgate and Peshkin, 1999), les robots récents ne peuvent prétendre être "collaboratifs" par définition et indépendamment de l'objectif et de la nature de leur utilisation. Dans ce sens, la dimension de sécurité en particulier doit être prouvée dans le contexte de l'utilisation et de la finalité par l'évaluation des risques, sans laquelle il serait illégal d'utiliser les robots dans des applications industrielles selon la plupart des réglementations (Vicentini, 2020).

Contrairement aux robots industriels « conventionnels » qui ont toujours été conçus pour être isolés par des grilles et barrières physiques afin d'assurer la sécurité des travailleurs. Désormais, la finalité d'usage et d'utilisation des robots dits collaboratifs par les opérateurs humains se traduit par le partage physique d'un même espace de travail. Malgré l'implémentation de différentes mesures de protection intrinsèques (fonctions de sécurité intégrées, capteurs de couple, etc.) et respect des exigences de sécurité normatives (ISO 10218-1, 2011) par les fabricants de cobots, les risques de ces nouveaux outils technologiques restent présents pour les utilisateurs. Il est important de faire la différence entre le robot, qui est considéré au sens de la directive machines 2006/42/CE comme une « quasi-machine » qui ne peut assurer à elle seule une application définie, et le système cobotique comprenant le cobot, son effecteur (une pince, une visseuse, etc.), les axes ajoutés, les capteurs, l'espace et les dispositifs de protection, etc. Le système cobot n'est pas sûr par définition. Mais sa sécurité doit être étudiée et assurée dans le contexte de l'utilisation prévue. À titre d'exemple, les préhenseurs (pince, visseuse, etc.), les pièces manipulées, la fréquence et l'environnement de travail, etc. peuvent être générateurs de risques graves de collision, de coincement, de pincement ou de coupure, etc.

À partir du moment où il y a une interaction entre l'humain et une partie du système cobot, le risque est présent. Selon le Ministère du Travail (Guide de prévention, 2017), trois types de risques liés à la robotique collaborative peuvent être distingués :

- Les risques liés au fonctionnement, à titre d'exemple :

En marche normale : l'apparition de surchauffe d'origine électrique ou mécanique, la modification d'une trajectoire, l'augmentation de la vitesse des éléments mobiles, ou le lâcher de charge manipulée, etc. ;

En cas de défaillance matérielle ou logicielle : une perte de contrôle ou le fonctionnement erratique des éléments mobiles, le dysfonctionnement fugitif rendant possible l'exécution de séquences interdites, etc. ;

- Les risques liés au poste de travail, comme par exemple : le contact physique avec les éléments mobiles entraînant des lésions, le risque de brûlure, d'écrasement, d'électrisation, etc. ;
- Les risques liés à l'environnement du poste de travail, comme par exemple : les obstacles liés aux locaux de travail, la co-activité avec d'autres machines, la circulation des personnes et des équipements mobiles, etc.

Pour limiter ces risques les normes NF EN ISO 10218-2 et ISO/TS 15066 régissant le domaine des robots collaboratifs prévoient quatre types de mesures de prévention (Figure 7) :

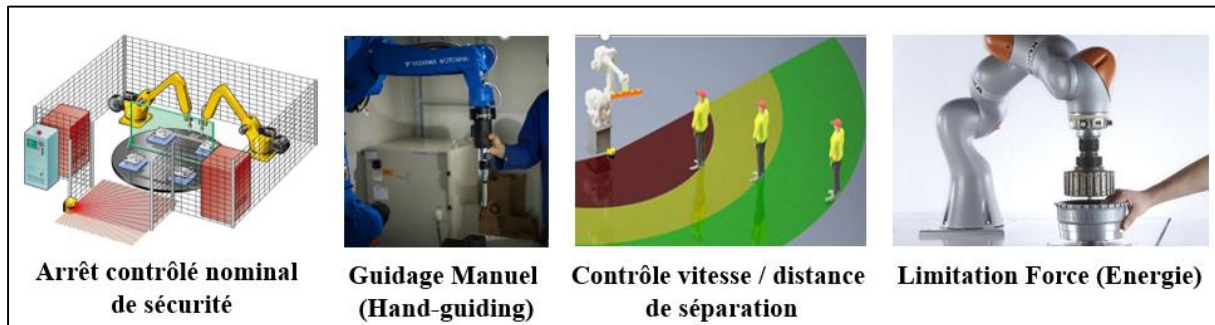


Figure 7. Mesures de prévention des risques- cas de la cobotique (Normes de sécurité)

- Arrêt contrôlé nominal de sécurité : selon ce principe de prévention, lorsqu'une personne pénètre de façon volontaire ou accidentelle dans l'espace de travail collaboratif, le cobot doit arrêter son mouvement et maintenir un arrêt de sécurité. Lorsque la personne quitte le périmètre du cobot, ce dernier reprend son mouvement ;
- Guidage manuel : l'opérateur dirige les mouvements du cobot, en vitesse limitée, à l'aide d'un dispositif de commande à action maintenue ;
- Surveillance de la vitesse et de la séparation : l'environnement du cobot est surveillé par un système de vision (type scanner laser) qui suit la position des opérateurs. En fonction de la vitesse et la distance de séparation entre opérateurs et cobot, ce dernier adapte sa vitesse. Les vitesses, la distance de séparation minimale et bien d'autres paramètres doivent être déterminés par l'analyse des risques (hypothèse de déplacement de l'opérateur, vitesse, etc.). Lorsqu'un opérateur dépasse la séparation de sécurité minimale, le cobot s'arrête ;
- Limitation de la puissance et de la force : ce principe est particulièrement adapté à la mise en place de solutions cobotiques qui nécessitent une interaction directe entre l'opérateur et le robot. Dans ce cas de figure, l'opérateur est amené à travailler à proximité du robot, et le cas échéant, à être en contact avec celui-ci. Ces contacts, s'ils se produisent, ne doivent pas être dangereux pour la santé et la sécurité des opérateurs. Des seuils limites à respecter en termes de puissance selon les différentes parties du corps sont déterminées conformément à la norme TS 15066 (Figure 8).

Body region	Specific body area		Quasi-static contact		Transient contact	
			Maximum permissible pressure ^a P_S N/cm ²	Maximum permissible force ^b N	Maximum permissible pressure multiplier ^c P_T	Maximum permissible force multiplier ^c F_T
Skull and forehead ^d	1	Middle of forehead	130	130	not applicable	not applicable
	2	Temple	110		not applicable	
Face ^d	3	Masticatory muscle	110	65	not applicable	not applicable
Neck	4	Neck muscle	140	150	2	2
	5	Seventh neck muscle	210		2	
Back and shoulders	6	Shoulder joint	160	210	2	2
	7	Fifth lumbar vertebra	210		2	2

Figure 8. Extrait des limites Biomécaniques (ISO TS 15066)

Dans tous les cas, en fonction du cahier des charges de l'application industrielle, la sécurité des utilisateurs doit être prouvée par une évaluation des risques, sans laquelle il serait illégal d'utiliser les cobots dans les applications industrielles.

1.3. Classifications et exemples d'application de la robotique collaborative

L'INRS⁷ (2018) distingue 4 types d'interaction entre les humains et les robots :

- Coexistence ou partage de l'espace de travail : les humains et les robots contribuent à la réalisation de tâches distinctes dans le même environnement spatio-temporel ;
- La collaboration directe : les humains et le robot travaillent simultanément sur une tâche commune ;
- Collaboration indirecte : les humains et le robot travaillent à tour de rôle sur la même tâche ;
- Assistance physique : dans ce cas, le robot apporte une assistance physique au geste professionnel en soulageant l'opérateur dans l'exécution de ses mouvements.

La cobotique étant identifiée comme un pilier du passage à l'industrie 4.0 ou « industrie du futur », de nombreuses industries ont tenté d'intégrer des robots collaboratifs. Toutefois, ces intégrations ont très souvent conduit à des scénarios d'exploitation du cobot sans interventions humaines. D'où la nécessité d'une classification prenant en compte non seulement le robot, mais surtout son contexte de fonctionnement. De ce point de vue, un même modèle de robot peut être utilisé sous différents scénarios d'interaction.

⁷ INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité (France)

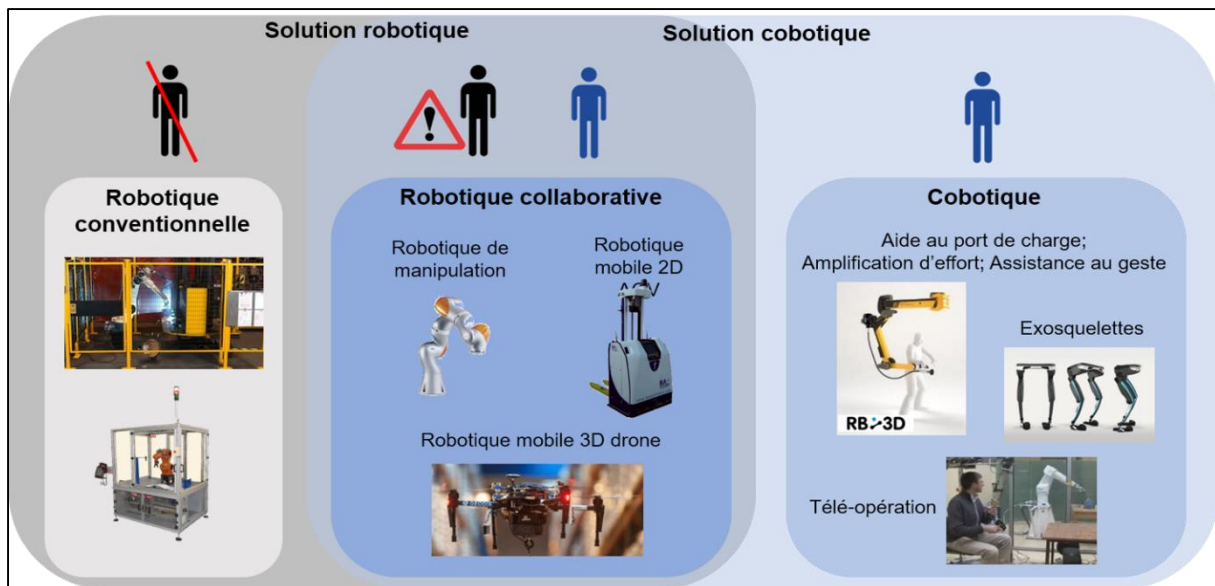


Figure 9. Proposition de classification de la robotique industrielle (Bounouar et al., 2019)

La figure 9 présente une proposition de classification de la robotique industrielle en distinguant 3 catégories de solutions : les solutions robotiques fonctionnant sans intervention humaine, les solutions cobotiques nécessitant une présence humaine permanente pour fonctionner et les solutions robotiques collaboratives pouvant interagir avec les opérateurs humains en effectuant des mouvements en autonomie, en partageant des tâches avec les opérateurs humains et en fonctionnant dans le même espace de travail qu'eux. Pour illustrer ces trois catégories, nous présenterons ci-dessous trois exemples d'applications différentes (1 exemple de chaque catégorie) en utilisant un même type de robot (un bras robotisé manipulateur) :

- **Les solutions robotiques "conventionnelles"** reprennent les éléments conventionnels de la robotique industrielle. Dans ce cadre, le robot réalise les tâches en autonomie, sans aucune intervention humaine. La principale évolution porte sur la possibilité de suppression des éléments de sécurité de type barrière ou grille, au profit de dispositifs immatériels de type barrière optique, scanner laser, etc. Les robots manipulateurs collaboratifs et les robots mobiles peuvent entrer dans cette catégorie si leurs fonctionnements ne nécessitent aucune présence humaine (exemple en Figure 10).



Figure 10. Exemple de solution robotique pour une opération de palettisation (vidéo : <https://youtu.be/7OBmVdUAdgk>)

- Contrairement à la catégorie précédente, **les solutions cobotiques** nécessitent une intervention humaine continue pour l'accomplissement des tâches. Dans ce cadre, les cobots, les exosquelettes ou encore les robots manipulateurs télé-opérés sont

manipulés/guidés par les utilisateurs. Ces solutions cobotiques sont souvent utilisées dans l'objectif de compenser le poids d'un objet ou d'un outil (exemple en figure 11).



Figure 11. Exemple de solution cobotique en utilisant un bras manipulateur (vidéo : <https://youtu.be/naZQoXHu0w0>)

- **Les solutions robotiques collaboratives** (comprenant des robots manipulateurs ou des robots mobiles) partagent le même espace de travail avec les opérateurs humains et interagissent avec eux selon le scénario de l'interaction, en préparant des outils, en déplaçant des produits ou en effectuant des opérations (perçage, peinture, vissage, etc.). Ces interactions peuvent être alternées ou parallèles. Voir exemple en figure suivante (Figure 12).



Figure 12. Exemple d'application robotique collaborative "Take and Place" (vidéo: <https://youtu.be/oXQxM8fE3c0>)

Des retours d'expériences de développement et de mise en place de robots collaboratifs pour des applications industrielles commencent à être publiés. Ils montrent la variété des domaines où la robotique collaborative peut apporter des pistes d'assistance des opérateurs humains. Par exemple, lors d'un processus d'assemblage manuel d'un cylindre pneumatique (Quenehen et al., 2019) ; ou lors du processus d'assemblage d'un joint homocinétique de voiture dans le secteur automobile (Cherubini et al., 2016) ; ou pour assister des opérations de nettoyage des cuves contenant un matériau pyrotechnique collant et visqueux (Moulières-Seban 2017) ; et pour assister les opérateurs lors des activités de polissage des catamarans caractérisées par leurs très grandes surfaces (Subrin et al, 2019), etc.

La classification proposée montre 3 niveaux d'interaction différents tout en utilisant le même robot manipulateur, d'où la question légitime sur le sens de l'appellation robot « collaboratif ». Quand est-ce qu'on peut parler d'une collaboration entre humains et robots ? et est-ce qu'on peut parler de « collaboration » humains-robots dans le cadre des cas d'exploitation actuels des robots collaboratifs (résultat du développement actuel de la robotique et des normes de sécurité

encadrant le domaine). Pour apporter des éléments de clarification à ces questions, il est nécessaire de clarifier au préalable le sens du mot « collaboration », déterminer les caractéristiques du travail en collaboration entre des humains, et comparer ces caractéristiques avec les capacités actuelles et prévisibles des robots industriels, en se basant sur les travaux de recherche actuels.

2. La notion de collaboration Humains-Robots

Le travail entre Humains prend souvent une forme partagée, dans laquelle deux ou plusieurs agents sont amenés à travailler ensemble autour d'une même tâche (Sheridan 2002). Dans la vie de tous les jours, plusieurs projets et situations de travail prennent cette forme collective (Hoc et Lemoine 1998 ; Benckroun et Weill-Fassina 2000). Ils sont considérés coopératifs ou encore collaboratifs. La collaboration est étudiée dans plusieurs disciplines scientifiques, chacune ayant des préoccupations, une culture et un vocabulaire différents. Trouver une définition universelle à la collaboration est donc une tâche assez ardue (Chellali, 2009). Dans cette section, nous cherchons à établir une liste des caractéristiques essentielles définissant l'attitude d'un travail à être collaboratif.

De nombreuses approches intéressantes ont donné lieu à des études sur la collaboration, des définitions ont pu être données de ce concept. Marx (1867) définit formellement le travail coopératif comme un groupe d'individus travaillant ensemble par rapport à une orientation déterminée dans le même processus de production, ou par rapport à des buts différents reliés à un même processus de production. Clarke et Smyth (1993) se réfèrent à la définition de Deutch (1962) « *co-operation is the situation where the movement of one member towards the goal will to some extent facilitate the movement of other members towards the goal* » et affirment qu'il doit y avoir, pour parler d'une situation de coopération, un but commun reconnu par l'ensemble des parties qui travaillent à sa réalisation.

Selon Terveen (1995) également, la collaboration est un processus dans lequel deux agents ou plus travaillent ensemble pour atteindre des objectifs communs. De cette définition découlent les caractéristiques essentielles à la collaboration suivantes :

- S'accorder sur les objectifs communs à atteindre ;
- Planification, répartition des responsabilités et coordination des tâches à accomplir : les agents doivent décider de la manière d'atteindre leurs objectifs, des actions à entreprendre par chaque agent, et de la coordination des actions entre eux ;
- Contexte partagé : les agents doivent pouvoir suivre les progrès accomplis dans la réalisation de leurs objectifs. Ils doivent suivre ce qui a été réalisé et ce qui reste à faire ;
- Communication : toute collaboration nécessite une communication pour définir des objectifs, négocier la manière de procéder, répartir les tâches et évaluer les progrès et les résultats ;
- Adaptation et apprentissage : la collaboration a une histoire, à la fois à court terme au sein d'une même session et à long terme sur plusieurs sessions. Une véritable collaboration au

fil du temps semble exiger que les partenaires s'adaptent les uns aux autres. L'apprentissage est un moyen de s'adapter. Dans une interaction collaborative, on peut apprendre de son partenaire à la fois directement, par exemple en se faisant dire ou montrer une façon nouvelle ou meilleure de faire les choses, et indirectement, en articulant, en justifiant et en expliquant ses actions et ses attitudes envers un partenaire.

Le concept de collaboration entre humains et machines a probablement d'abord concerné la collaboration Homme-ordinateur (Human-Computer Collaboration, HCC). Avec l'apparition de ce concept, plusieurs chercheurs se sont intéressés au débat sur sa nature et ses caractéristiques. Terveen (1995) a indiqué que la HCC était inspirée par deux domaines principaux : l'intelligence artificielle et l'interaction Homme-ordinateur. Ces deux disciplines ont fait naître deux approches différentes de traitement de la HCC : l'approche émulative (human emulation) et l'approche complémentaire (human complementary). Alors que la première approche vise à doter la machine de capacités semblables à celles de l'Homme pour l'amener à collaborer, la seconde s'intéresse aux aspects asymétriques des deux types d'agents et de la répartition des rôles entre eux.

Selon Pavard (1994), la notion de coopération fait référence systématiquement à une activité humaine, et l'on ne pourra envisager de parler de coopération Homme-système que lorsqu'on accolera à ce dernier le qualificatif d'intelligent. Ceci peut être formulé au travers d'un ensemble de critères :

- 1- Avoir un objectif commun, ce qui suppose la capacité pour chacun des partenaires d'afficher l'objectif qu'il poursuit et de posséder de méta-connaissance concernant l'activité déployée ;
- 2- Être en mesure d'accéder aux informations sur le but poursuivi par le partenaire durant toute la session de résolution ;
- 3- Disposer d'un outil de communication ;
- 4- Être capable de s'adapter à l'évolution du comportement du partenaire au cours du temps (perception de l'évolution et modification de son propre comportement).

Plutôt que de juger en mode binaire l'aspect coopératif d'un système homme-machine, une autre approche intéressante pour décrire la coopération consiste à définir des niveaux de collaboration et de coopération d'un système homme-machine (Parasuraman et al. 2000 ; Pacaux-Lemoine et al. 2011 ; Pacaux-Lemoine et Vanderhaegen 2013).

L'interaction entre humains et machines ne se fait plus seulement au niveau de la communication (commandes écrite ou orale) comme le cas des ordinateurs. Les robots peuvent se déplacer en roulant ou en marchant (Patle et al., 2019). Ils peuvent émettre des signes visuels, du son et capter des informations visuelles et sonores (Mavridis, 2014), comme ils peuvent également interagir avec des objets physiques de l'environnement (capteurs de présence, capteurs de force, etc.)

Grâce au développement technologique dans les domaines de l'intelligence artificielle, plusieurs projets de recherche s'intéressent à développer des solutions de communication (Miyachi et al., 2017), de perception et de reconnaissance des gestes (Fontmarty, 2007) et d'anticipation de mouvement (Piçarraa, 2018) adaptées aux robots. Actuellement, la majorité

de ces comportements programmés et démonstrateurs développés montrent, au mieux, la capacité d'un système à enchaîner quelques échanges simples avec un utilisateur, ou à reconnaître un objet ou un geste dans un cadre d'application restreint et pour le moment loin d'être exploitable en conditions de cadences industrielles.

L'analogie qui est faite entre la coopération Homme-Homme et la coopération Homme-système trouve sa limite dans la palette des comportements programmés de la machine dans l'étendue des contextes qui peuvent être pris en compte par celle-ci. Pavard (1994)

Conclusion

La robotique industrielle est un domaine qui connaît des évolutions rapides et remarquables. Les solutions robotiques, en évolution continue, vont continuer à transformer le travail, et impacter donc la place de l'opérateur humain dans le milieu industriel.

L'apparition de robots "collaboratif" pouvant partager le même espace de travail avec les opérateurs humains, et l'évolution des normes de sécurité pour encadrer cette évolution représentent des opportunités intéressantes pour des débats multidisciplinaires autour des caractéristiques du travail de demain.

Dans le cadre de ce manuscrit de thèse, nous utiliserons les termes robots collaboratifs et cobots de façon interchangeable pour faire référence à cette génération de robots qui peut partager le même espace de travail avec des humains et qui ouvre différentes possibilités d'usage : en mode autonome sans aucune intervention humaine, en mode interactif en partageant des tâches avec les opérateurs humains ou encore en mode guidé par les utilisateurs.

L'utilité humaine (assistance, collaboration, etc.) n'est pas automatique, mais plutôt dépendante de la méthodologie de conception et de la pertinence vis-à-vis des besoins réels des utilisateurs potentiels. L'enjeu reste donc au niveau de la démarche de conception du système Humains-Robots (répartition des tâches, technologie, espace, etc.) pour déterminer, pour chaque situation de travail, s'il y a un besoin robotique, et les solutions robotiques et scénarios d'interaction qui pourraient répondre à celui-ci.

À travers le chapitre suivant, nous discuterons les principales méthodologies et modèles de conduite de projet s'intéressant à la prise en compte des utilisateurs lors des processus de conception. Nous présenterons également les indicateurs utilisés pour tenir compte de l'aspect humain durant l'intégration des nouvelles technologies, et nous présenterons nos propositions méthodologiques visant à assister les équipes de conception des systèmes humains-robots pour une meilleure prise en compte des utilisateurs durant le processus de conception des systèmes cobotiques.

Chapitre 2

Propositions méthodologiques : Vers une prise en compte des Humains durant les processus de conception et d'évaluation des systèmes humains-robots

Introduction

L'arrivée des robots collaboratifs a fait émerger des débats et des discussions autour de la place de l'Homme dans les futurs systèmes de production munis de robots collaboratifs, des enjeux de sécurité des futurs utilisateurs et de rentabilité de ces investissements. Ces discussions reflètent un besoin en termes de contributions méthodologiques de conduite des processus de conception centrées sur l'humain prenant en compte les différents enjeux liés à la cobotique. Des méthodologies qui ne se focalisent pas seulement sur l'élément technologique, mais qui intègrent également son utilisation potentielle, en prenant en compte le travail réel et les futurs utilisateurs dès les premières phases de conception.

Dans ce chapitre, nous discuterons un état des lieux qualitatif des principaux domaines et contributions visant la prise en compte des humains lors des processus de conception et d'évaluation des systèmes interactifs (systèmes humain-machine), et nous présenterons trois propositions méthodologiques adaptées au contexte de la cobotique industrielle (systèmes humains-robots) : un cadre méthodologique de conduite des projets cobotiques, une approche ergonomique d'analyse du travail dans une perspective de cobotisation et une méthodologie d'évaluation des solutions cobotiques potentielles.

1. Etat des lieux des démarches de prise en compte des humains durant la conception des systèmes Humains-machines

Dans cette section, nous présentons des exemples intéressants des méthodologies et de disciplines s'intéressant, d'une manière ou d'une autre, à la prise en compte des dimensions humaines durant les processus de conception. La plupart de ces méthodologies n'ont pas été développées dans le cadre du nouveau contexte des projets de conception des systèmes humains-robots et ne prennent pas nécessairement en compte tous les défis de la robotique collaborative (sécurité, acceptabilité, performance, etc.). Néanmoins, elles représentent une source d'inspiration importante dans l'objectif de développer des outils d'aide à la conception centrés sur l'humain et adaptés au contexte de la robotique collaborative.

1.1 La Conception centrée sur l'utilisateur

La norme ISO 9241 (2010) fournit un cadre pour la conception centrée sur l'Homme. Selon cette norme, une approche centrée sur l'Homme doit suivre, entre autres, les principes énumérés ci-dessous :

- A. La conception est basée sur une compréhension explicite des utilisateurs, des tâches et des environnements : la conception des produits, des systèmes et des services doit tenir compte de leurs utilisateurs et de ceux qui peuvent être affectés directement ou indirectement par leur utilisation ;
- B. Les utilisateurs sont impliqués tout au long du processus de conception et de développement : la participation des utilisateurs à la conception est une source précieuse de connaissances sur le contexte d'utilisation, les tâches et la manière dont les utilisateurs sont susceptibles de travailler avec le futur produit ;
- C. La conception est pilotée et adaptée par une évaluation centrée sur l'utilisateur : l'évaluation et l'amélioration de la conception sur la base des retours des utilisateurs sont des moyens efficaces pour réduire le risque que le système final ne réponde pas aux besoins des utilisateurs ou de l'organisation ;
- D. Le processus est itératif : l'itération implique que les descriptions, les spécifications et les prototypes sont révisés et affinés lorsqu'une nouvelle information apparaît au cours de la conception ;
- E. L'équipe de conception englobe des compétences et des perspectives multidisciplinaires : l'équipe de conception centrée sur l'utilisateur doit être suffisamment diversifiée pour garantir la prise en compte des différents aspects de la conception. Un avantage supplémentaire d'une approche multidisciplinaire est que les membres de l'équipe deviennent plus conscients des

contraintes et des réalités des autres disciplines ; par exemple, les experts techniques peuvent devenir plus sensibles aux problèmes des utilisateurs, et les utilisateurs peuvent devenir plus conscients des contraintes techniques.

La figure 3 illustre l'interdépendance des étapes d'une conception centrée sur l'Homme. Il ne s'agit pas d'un processus linéaire, mais plutôt d'une illustration du fait que chaque étape de la conception centrée sur l'utilisateur utilise les résultats des étapes obligatoires précédentes comme éléments d'entrée. Après chaque évaluation, le retour à l'étape précédente appropriée est effectué.

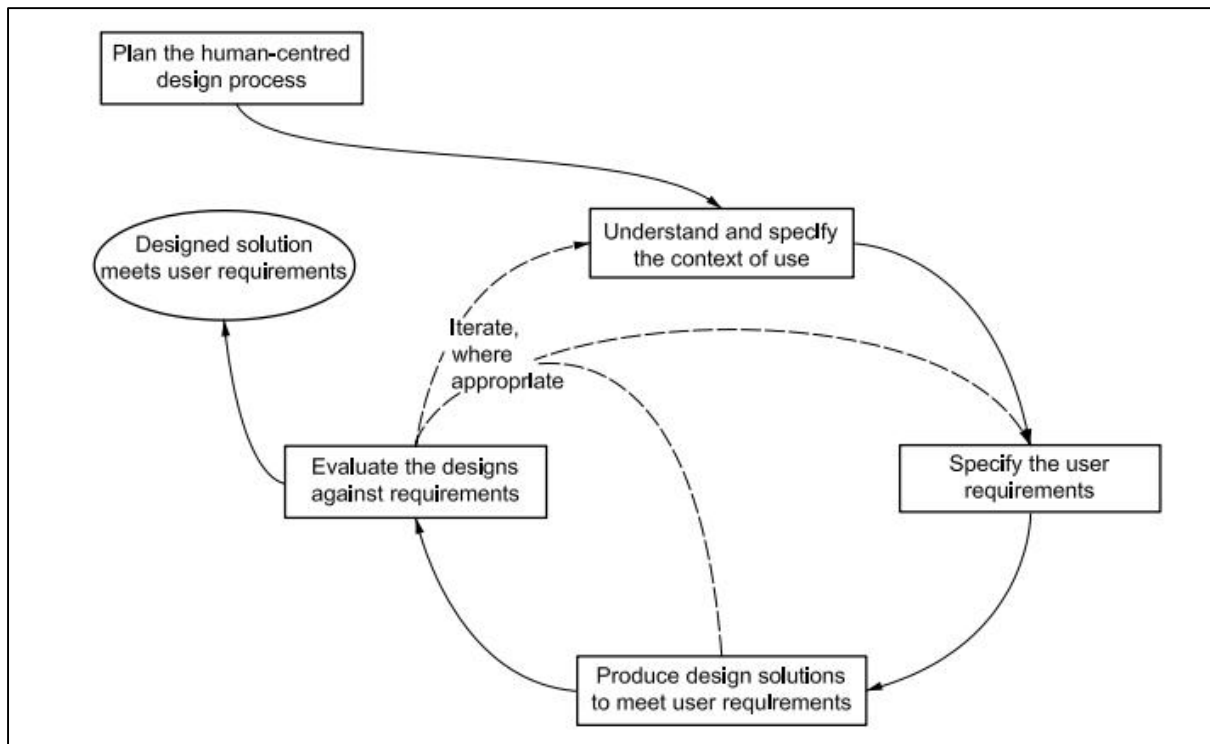


Figure. 13 Interdépendance des étapes de conception centrée sur l'utilisateur, source : ISO 9241 (2010)

Si la norme ISO 9241 fournit des informations concentrées sur les principes de base d'une conception centrée utilisateur, cette dernière n'est évidemment pas limitée à une norme ; mais il existe de nombreuses contributions scientifiques intéressantes traitant la conception centrée sur l'utilisateur ou fournissant des retours d'expérience sur la mise en œuvre de cette approche (Norman et Draper 1986 ; Bodker 1999 ; Buur et Soendergaard 2000 ; Boy 2013 ; Wever et al. 2008).

Pour surmonter les défis qui découlent de la gestion de multiples sous-systèmes pendant la conception et le développement des systèmes sociotechniques, des propositions intéressantes consistant à construire un plan d'intégration des capacités et des limites humaines pendant le processus de conception ont été développées (Fitts et al. 2008 ; Boy et Narkevicius 2014). Ce plan d'intégration est généralement formalisé sous la forme d'un programme d'intégration des systèmes humains (ISH) qui intègre les aspects centrés sur l'Homme aux aspects organisationnels (ingénierie industrielle) et technologiques (ingénierie des systèmes).

Les avantages potentiels d'une conception centrée sur l'humain dans le contexte de la conception de systèmes humain-robot sont évidents. La conception multidisciplinaire et itérative ou encore la participation des futurs utilisateurs pendant la phase de répartition des tâches entre les humains et les robots et pendant les phases d'évaluation et de test des solutions potentielles sont toutes nécessaires à la conception des systèmes cobotiques centrés sur l'humain.

1.2 Le Design Thinking

Le Design Thinking (DT), popularisé par IDEO⁸ et l'Université de Stanford, est une approche basée sur l'empathie et utilisant des outils et des méthodes pour permettre à des équipes pluridisciplinaires d'innover en faisant correspondre les attentes des utilisateurs, la faisabilité technologique et la viabilité économique. (Brown et Barry, 2011)

L'objectif de l'approche Design Thinking est de sortir des cadres traditionnels de conception qui se concentrent sur les résultats du processus (l'objet créé), pour aller vers une conception basée et nourrie par les besoins réels des futurs utilisateurs. Elle s'articule sur des étapes itératives dont la source d'inspiration première est la compréhension des individus pour lesquels on veut innover (les utilisateurs finaux). Dans cette approche, plutôt que de développer l'ensemble du produit (service, espace, technologie, organisation, etc.) pendant des mois et de présenter sa forme finale au client ou au donneur d'ordre, seules les briques demandées doivent être développées et testées avec les utilisateurs en boucles courtes, en contexte réel jusqu'à la finalisation et la mise en œuvre. (Mathieu et Hillen, 2016)

Il existe plusieurs variantes de processus dans le Design Thinking, la plus populaire est celle développée par la d.school de l'Université de Stanford qui définit le processus en cinq étapes (voir figure 14) : Empathize ; Define ; Ideate ; Prototype ; Test. Ces étapes se succèdent logiquement, mais ne doivent pas être prises comme un processus linéaire (The Bootcamp Bootleg, 2013).

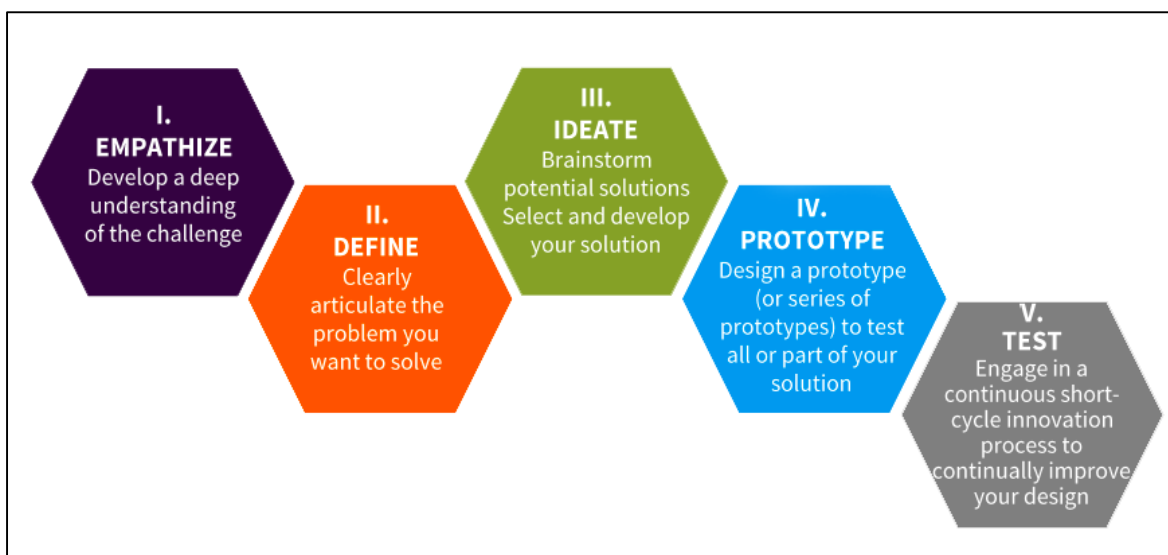


Figure 14. Les 5 étapes du Design Thinking

⁸ IDEO est une entreprise de design américaine créée en 1991

1.3 La Conception centrée sur l'activité – L'ergonomie

Parmi les disciplines intéressantes qui contribuent à la prise en compte des aspects humains dans les projets de conception, on trouve la conception centrée sur l'activité ou l'ergonomie centrée sur l'activité. Il s'agit d'une discipline qui se base sur la prise en compte du travail réel afin d'alimenter les étapes des projets de conception.

Cette discipline se base sur la mise en évidence des nombreuses formes de variabilité rencontrées dans les situations de travail quotidiennes, et sur le fait que les niveaux de performance requis en termes de qualité et de productivité sont souvent maintenus par les opérateurs, qui ne sont pas considérés comme de simples exécutants des standards fournis par l'organisation, ni des observateurs passifs en cas de difficultés rencontrées. En effet, le bon fonctionnement des installations industrielles dépend des connaissances déployées par les opérateurs pour gérer les différentes variabilités et anticiper leurs raisons et effets potentiels (Garrigou et al. 1994). Cette discontinuité entre ce qui est demandé aux opérateurs (la tâche prescrite) et ce qu'il faut pour la réaliser (l'activité) doit être prise en compte lors des processus de conception.

L'ergonomie centrée sur l'activité (Theureau et Pinsky 1984, Daniellou 1987, Maline 1994, Garrigou et al. 1995) a développé des approches intéressantes de conception et de gestion de projet pour prendre en compte le travail réel lors des processus de conception. Ces approches pourraient être structurées en 3 étapes principales : l'analyse, la simulation et l'accompagnement (Barcellini et al. 2013) :

- Analyse du projet et du travail : cette étape porte sur la compréhension du projet (identification du travail prescrit actuel, des humains impactés par la situation future, des données de santé et de performance liées au projet, etc.) et sur le travail réel des opérateurs en identifiant les sources de variabilité, et les stratégies mises en œuvre par les opérateurs pour répondre aux objectifs industriels ;
- La simulation : cette étape est la rencontre des approches descendantes (à partir des connaissances expertes) et ascendantes (à partir de l'analyse du travail réel). Elle permet de produire des prévisions sur les difficultés que les opérateurs pourraient rencontrer dans leur activité future (Garrigou et al. 2001). La simulation ne vise pas à prescrire la "bonne façon" de réaliser les tâches, mais à prendre en compte les formes potentielles de l'activité future, à vérifier leur acceptabilité et à alimenter la réflexion dans un but d'analyse-simulation-conception continue, jusqu'à trouver des solutions acceptables par les différents intervenants du projet ;
- L'accompagnement : cette étape vise à s'assurer que les scénarios privilégiés sont validés par les décideurs du projet, et qu'ils sont mis en œuvre.

L'un des objectifs centraux d'une approche ergonomique est de parvenir à des accords pour le développement conjoint de la santé, de la performance et des personnes (Benckroun, 2015). En centrant le dialogue entre les parties du projet sur le travail et l'activité, et en orientant les choix vers la recherche des solutions qui élargissent les "marges de manœuvre" des opérateurs (Benckroun, 2017), afin que face à la variabilité, ils puissent mettre en œuvre des solutions cohérentes avec leur diversité et leur propre variabilité (Bélanger et al. 1991).

Cette approche a été testée dans un contexte cobotique récemment par (Bitonneau, 2018) et (Moulières-Seban, 2017) afin de répondre à un besoin industriel du groupe Ariane, cherchant à assister une opération de nettoyage de cuves contenant des produits pétrochimiques. Pour limiter les risques liés à une mauvaise intégration humaine dans les projets de conception, un "Human Integration Readiness Levels" a été proposé par Moulières-Seban (2017). Cet indicateur, basé sur les "Technology Readiness Levels" et les "Human Factors Engineering Process Integrating Points" de la NASA, combine des niveaux de maturité (9 niveaux) avec l'approche de gestion de projet de l'entreprise Safran.

1.4 Modèles de conception centrés sur l'utilisateur

En plus des approches et des communautés brièvement présentées dans les trois sections précédentes, plusieurs auteurs ont apporté des contributions précieuses de modèles de conception visant à prendre en compte des dimensions humaines lors du développement des systèmes Homme-machine. L'objectif principal de cette section est de mettre en évidence les aspects fondamentaux lors du processus de conception des systèmes Homme-machine, et de s'inspirer de quelques exemples intéressants de modèles de gestion de projet de conception afin de formaliser des lignes directrices pour le contexte spécifique de la conception des systèmes cobotiques.

Le modèle en cascade de Boehm (1981) est l'un des premiers modèles développés pour répondre aux besoins industriels en termes de productivité et de qualité des logiciels. Ce modèle décrit le cycle de vie du logiciel comme une succession de huit étapes résumées dans la figure 15. Bien que le modèle en cascade soit l'un des modèles les plus utilisés dans les entreprises au cours des années 1990, il impose certaines contraintes. Par exemple, les retours en arrière se limitent à un retour à l'étape immédiatement précédente. Cela n'encourage pas les changements et tend à stabiliser rapidement le produit. La prise en compte des utilisateurs est limitée à l'étape de l'analyse des besoins ; ils ne sont plus vraiment considérés dans les étapes suivantes (Kolski 1995).

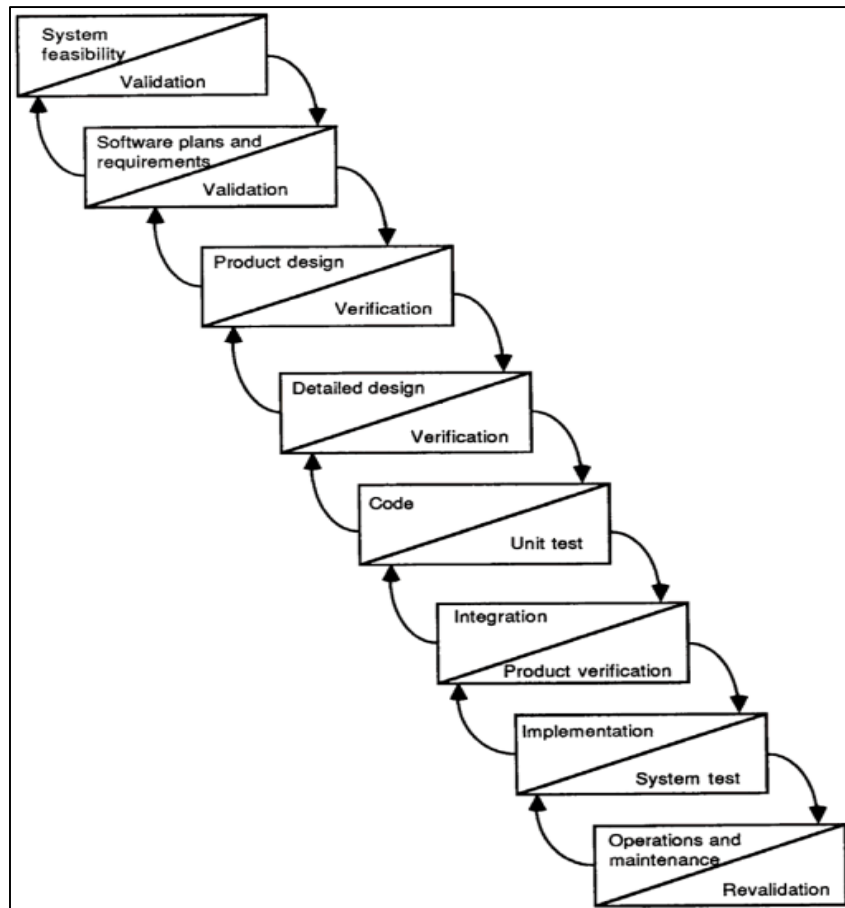


Figure. 15 Modèle en cascade du développement de logiciels (Boehm, 1981)

Coutaz (1987) a proposé une adaptation du modèle en V pour prendre en compte les dimensions humaines en intégrant des étapes considérant le point de vue de l'utilisateur (figure 16). Cependant, ce modèle représente toujours un processus de conception linéaire, alors que de nombreuses études ont montré que les applications interactives sont développées par une succession d'itérations du processus de conception (Caffiau 2009).

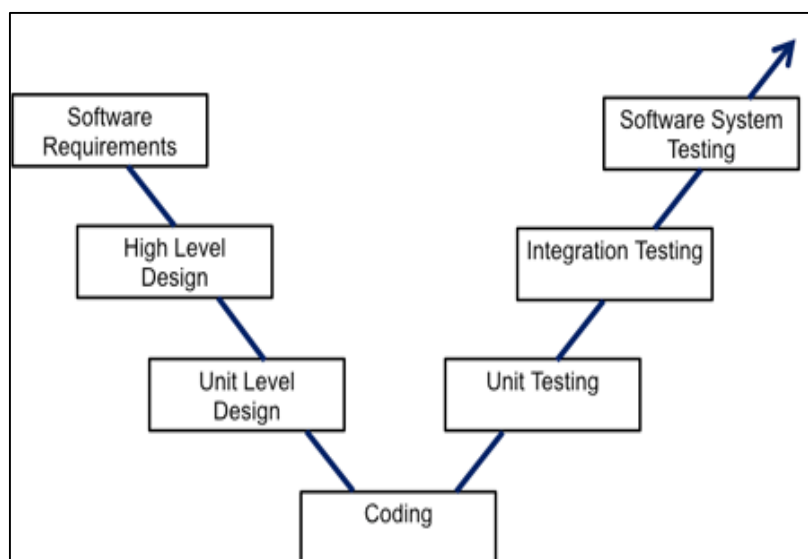


Figure. 16 Modèle en V adapté par Coutaz (1987)

Contrairement au modèle précédent, le modèle en spirale introduit par Boehm et al. (1984) représente un processus itératif (figure 17). Ce modèle semble intéressant pour le développement de logiciels hautement interactifs, car les besoins sont formulés de manière progressive, les risques sont analysés et résolus au fur et à mesure qu'ils sont rencontrés avant de commencer le développement détaillé, et les solutions sont prototypées et évaluées depuis le début du cycle de conception.

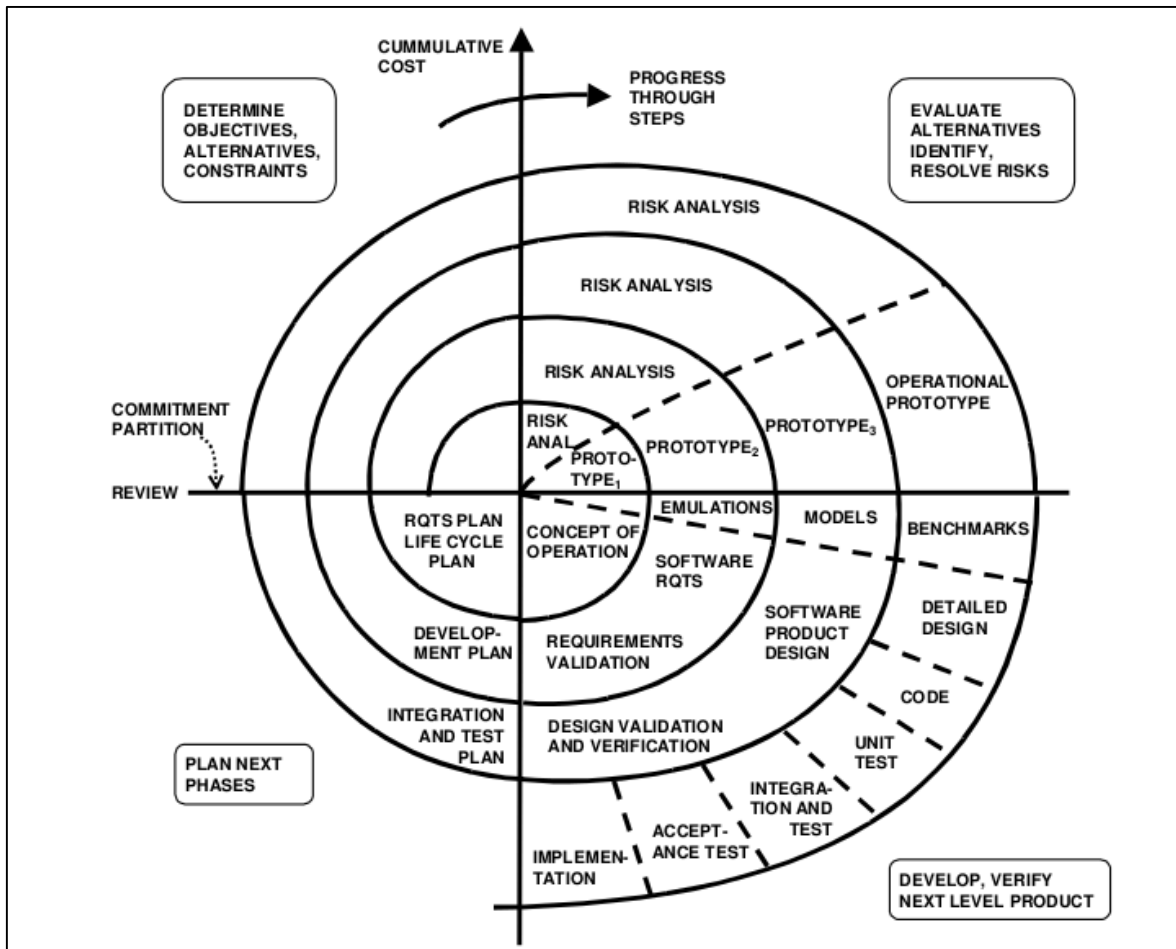


Figure. 17 Modèle en spirale de Boehm (1984)

Cependant, ce modèle présente quelques inconvénients ; par exemple, il n'intègre pas explicitement l'analyse des besoins et des activités de l'utilisateur, même si son processus les implique (Riahi, 2004). Le point de départ de chaque itération étant l'analyse des risques, fait de ce modèle un modèle principalement adapté à la conception d'applications pour lesquelles la sécurité des applications est un élément essentiel (Caffiau 2009).

D'autres modèles itératifs prenant en compte les besoins des utilisateurs existent. Par exemple, le modèle développé par Hartson et Boehm-Davis (1993) permet d'intégrer des étapes spécifiques liées aux utilisateurs, telles que l'analyse de leurs tâches, la précision de leurs besoins et l'évaluation de l'adéquation des produits/interfaces développés avec ces besoins (figure 18).

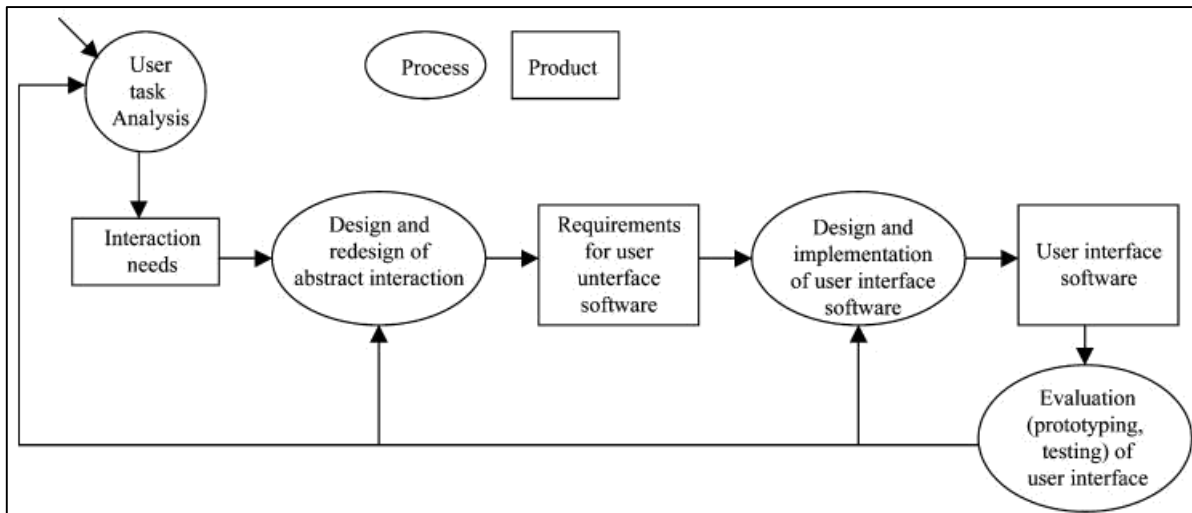


Figure. 18 Cycle de conception des interfaces utilisateur selon Hartson et Boehm-Davis (1993)

Plusieurs autres auteurs ont contribué au développement de cadres méthodologiques qui prennent en compte les dimensions humaines dans le processus de conception des systèmes interactifs. Citons par exemple le modèle développé par Curtis et Hefley (1994), incluant des étapes parallèles de l'ingénierie de l'interface utilisateur et de l'ingénierie logicielle au cours du processus de conception. Rasmussen et al. (1987) ont développé l'analyse cognitive du travail (CWA), un cadre original pour l'analyse, la conception et l'évaluation des systèmes sociotechniques complexes. Axée sur le comportement de l'information au travail, la CWA part du principe que pour pouvoir concevoir des systèmes qui fonctionnent harmonieusement avec les humains, il faut comprendre le travail des acteurs, leur comportement en matière d'information, le contexte dans lequel ils travaillent et les raisons de leurs actions. Basé sur l'analyse du comportement informationnel, ce cadre évalue d'abord le système déjà en place, puis élabore des recommandations pour la conception.

Une autre approche originale dédiée à la conception et à l'évaluation des systèmes Homme-machine et de leur coopération, appelée méthode en U, a été développée (Milot 1990 ; Milot et Roussillon 1991). Cette approche se compose de deux phases :

- Une phase descendante de modélisation du système Homme-machine (figure 19) : cette étape consiste à analyser le système à interfacier et vise à définir les différents cas de dysfonctionnement prévisibles, et ainsi à préparer l'étape suivante d'analyse des tâches humaines. Une fois la modélisation du système terminée, l'analyse des tâches humaines prescrites vise à établir les activités que les utilisateurs auront à réaliser. Cette analyse doit tenir compte du modèle des différents utilisateurs en termes de limites et de ressources physiques et cognitives.

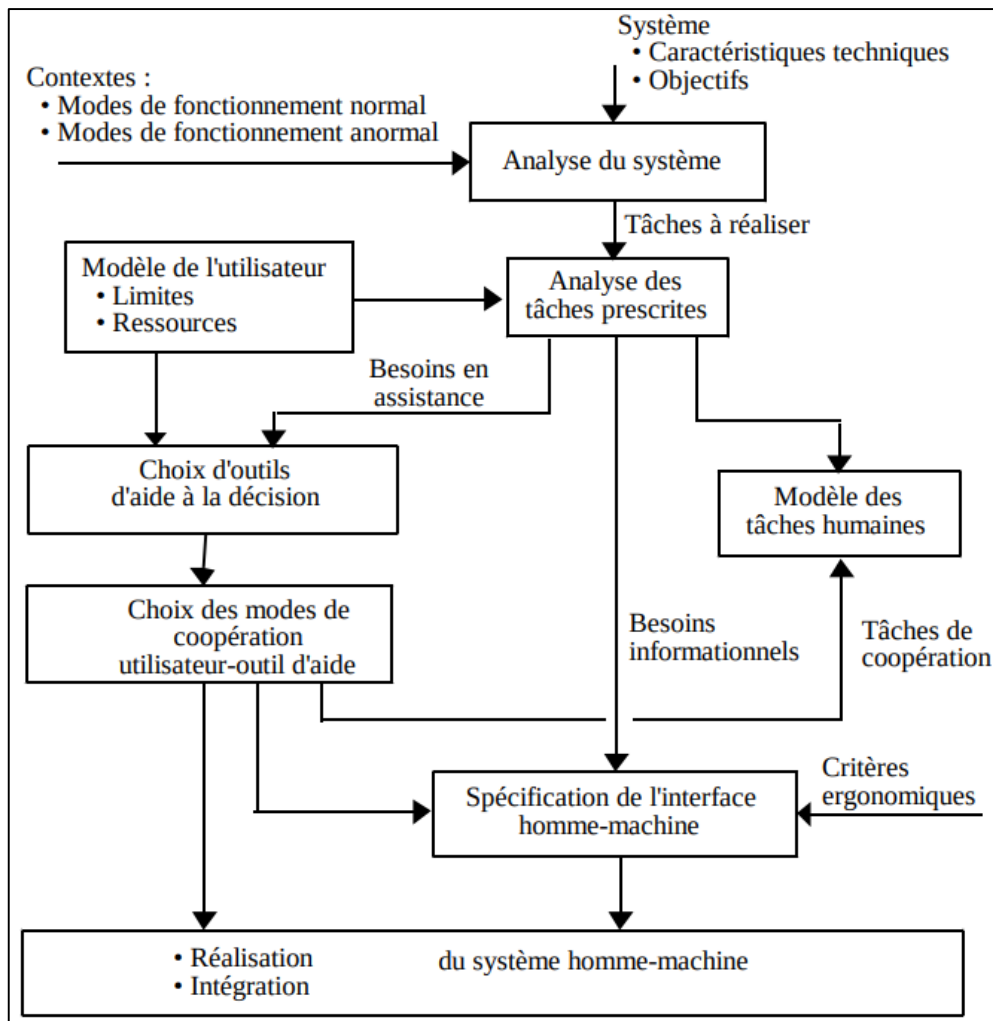


Figure 19. Phase descendante (adaptée par Kolski 1995 de Millot et Roussillon, 1991)

- Une phase ascendante consistant en l'évaluation du système global (figure 20) : La phase d'évaluation vise à valider le système interactif conçu dans la phase descendante. La prise en compte de l'utilisabilité du système Homme-machine et de ses performances.

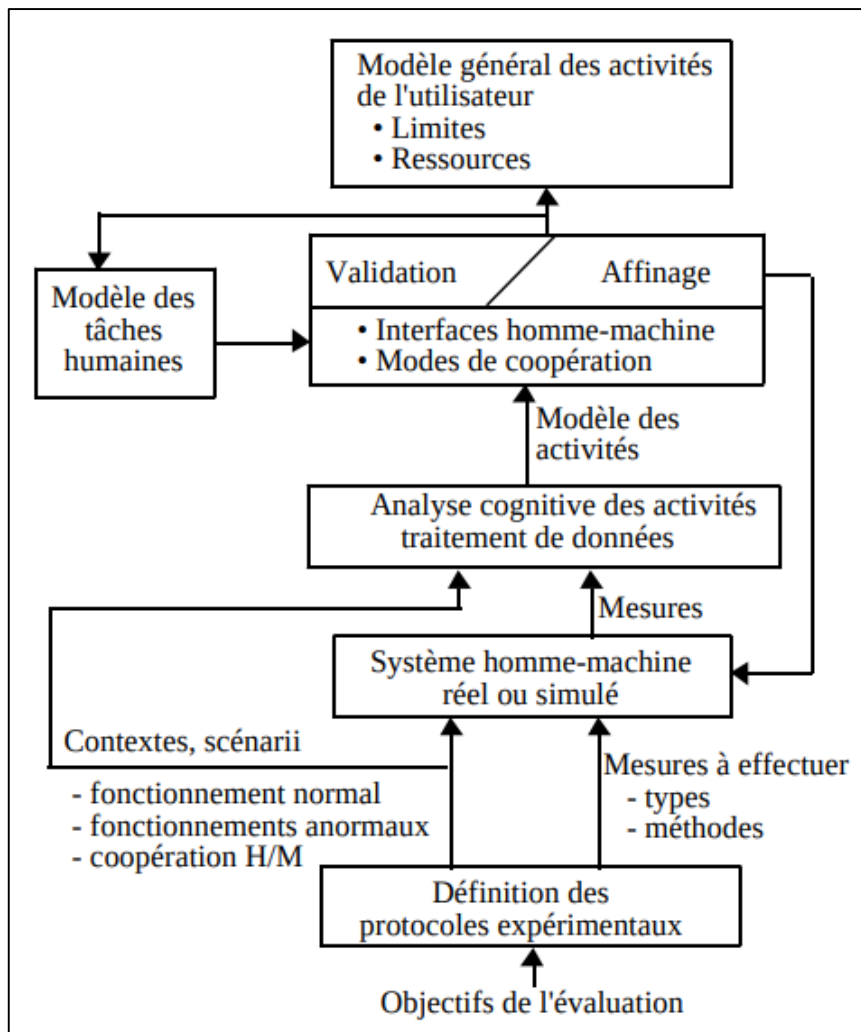


Figure 20. Phase ascendante d'évaluation (Millot et Roussillon, 1991)

Des contributions importantes ont été développées par Sagot (2003, 2005), un des chercheurs qui ont souligné que seule une approche interdisciplinaire, reposant sur les compétences des sciences pour l'ingénieur et des sciences humaines et sociales, peut donner une réponse au défi d'une meilleure prise en compte des facteurs humains dans les démarches de conception.

Sagot (2005) a mis en avant l'importance de la notion d'usage, en soulignant que de nombreux produits qui nous entourent ont perdu ce souci primordial d'être une réponse aux besoins d'usage, et que la "clé du succès" du progrès technique réside dans l'adéquation entre les performances du nouveau système ou du nouveau produit et ceux qui en auront la conduite. La connaissance de l'Homme, de ses comportements, doit être au cœur de la démarche de conception et ceci, dès l'analyse des besoins et se poursuivre tout au long du processus de conception (figure 21).

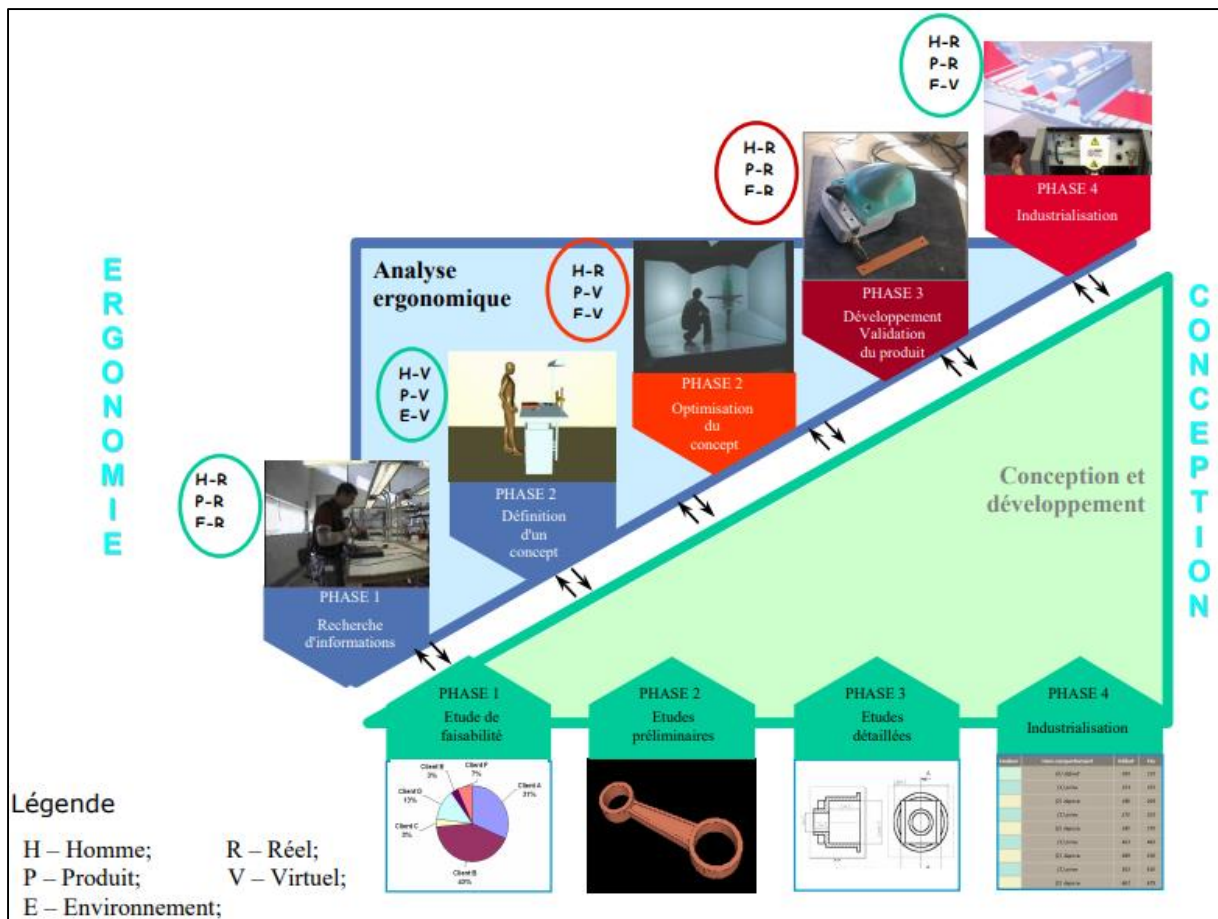


Figure 21. Processus de conception traduisant l'articulation ergonomie-conception (Sagot, 2005)

Afin d'éviter un rejet définitif des produits conçus, le modèle en étoile développé par Hix et Harston (1993) (figure 22) propose un modèle de conception permettant des itérations entre les différentes étapes du processus (analyse de la tâche, spécification des besoins, prototypage, conception, mise en œuvre) à travers une étape d'évaluation intermédiaire.

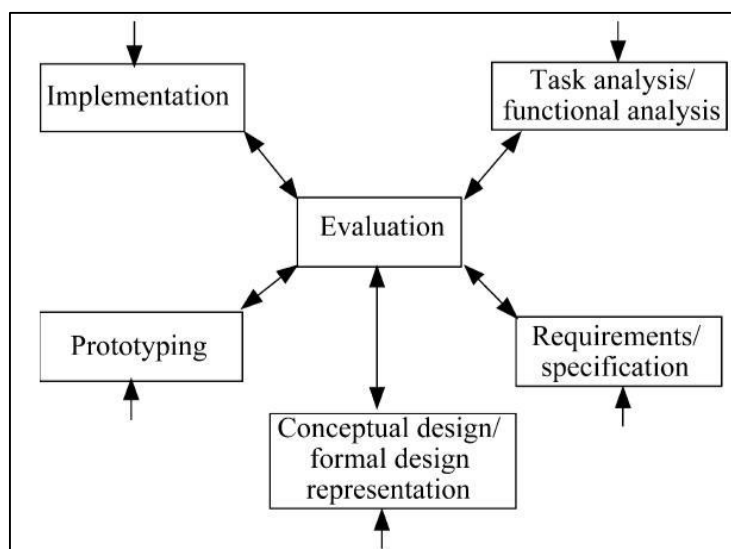


Figure. 22 Modèle en étoile de Hix (1995)

Comme dans tout projet de conception technologique, la phase d'évaluation a un rôle primordial pour garantir que le système conçu réponde aux objectifs et aux exigences attendus. Dans le cas de la robotique collaborative, l'évaluation des solutions potentielles Humains-robot nécessite la prise en compte d'enjeux complémentaires : économiques, humains et de sécurité. Dans la section suivante, nous présenterons différents critères et méthodologies d'évaluation qui pourraient être utilisés pour s'assurer que les systèmes Humains-robots développés répondent aux différents défis liés à la robotique collaborative. Nous nous focaliserons plus en détail sur les indicateurs et méthodologies existantes d'évaluation des dimensions humaines, car les dimensions liées à la performance et à la sécurité sont souvent prises en compte dans tout projet de conception technologique.

2. Etat des lieux des indicateurs et démarches d'évaluation des systèmes Humains-Robots

Tout au long de la 1^{ère} section de ce chapitre, nous avons présenté et discuté les principes fondamentaux d'une prise en compte des humains durant les processus de conception des systèmes humains-machines et d'intégration d'une nouvelle technologie. Les étapes d'évaluation sont parmi les phases primordiales pour s'assurer que le futur système répondra à l'ensemble des enjeux. Les étapes d'évaluation consistent à porter un jugement sur le produit à concevoir (service, technologie, organisation, etc.), en considérant divers critères et enjeux liés à l'adéquation avec les besoins des utilisateurs, aux bénéfices économiques et aux dimensions technologiques et de sécurité.

Tout d'abord, comme pour l'intégration de tout autre moyen de production, le choix de l'investissement dans des cellules robotiques collaboratives est souvent déterminé et orienté par des critères techniques et économiques. Il est naturel que les dimensions liées aux coûts d'achat et de mise en service de la cellule robotique, à l'impact sur la qualité et la productivité des postes de travail concernés, au retour sur investissement et à la prévision des opérations de maintenance générées soient discutées et considérées. La discussion des possibilités technologiques lors du processus de conception des systèmes Humains-robots, leur faisabilité et leur adéquation avec les normes de sécurité en vigueur occupent également une place importante dans le processus de conception.

Alors que la performance, la sécurité et la faisabilité technologique sont mesurables et sont souvent prises en compte durant les processus de conception, la prise en compte des utilisateurs est beaucoup plus difficile à quantifier. Elle nécessite souvent des méthodologies qualitatives pour qu'elle soit évaluée, comme des tests utilisateurs, des simulations, une analyse ergonomique ou encore l'utilisation de questionnaires. Ces types d'évaluation nécessitent la définition de protocoles expérimentaux rigoureux, qui visent à définir les données à collecter et la manière dont elles seront analysées. Dans cette section, nous présentons brièvement

différentes dimensions importantes à prendre en compte lors de la conception des systèmes cobotiques. Nous présentons à travers les parties suivantes les différents types de méthodologies et de critères utilisés pour prendre en compte l'aspect humain durant les projets de conception.

2.1 Critères biomécaniques et physiologiques

Les critères biomécaniques et physiologiques pourraient être utilisés pour sélectionner les robots qui génèrent le moins de sollicitation d'effort de la part des utilisateurs pour une application donnée. Par exemple, Kuli'c et Croft (2007) ont utilisé des mesures physiologiques pour évaluer l'état émotionnel des utilisateurs pendant l'interaction avec les robots. Ils ont mesuré le rythme cardiaque, la conductance de la peau et la contraction des muscles faciaux des utilisateurs potentiels tout en observant les mouvements du robot. Dans le même sens, afin d'évaluer l'acceptabilité des robots collaboratifs, Weistroffer et al. (2014) ont utilisé des mesures de la fréquence cardiaque et de la conductance cutanée des utilisateurs immédiatement après l'interaction avec un robot.

Maurice et al. (2017) ont utilisé des indicateurs d'évaluation des contraintes biomécaniques lors d'une activité de conception d'un robot collaboratif pour une application de co-manipulation. Dans le cadre de ce travail, plusieurs indicateurs tels que l'équilibre corporel, la capacité de génération de force et de mouvement, la dextérité de rotation de la tête et l'énergie cinétique du corps ont été définis pour estimer les différentes demandes biomécaniques qui se produisent pendant les activités manuelles, quantifier l'influence de chaque paramètre du robot et identifier ceux qui devraient principalement être modifiés pour améliorer son 'ergonomie'. Ces indicateurs ont été mesurés à l'aide des simulations virtuelles dynamiques pour différentes caractéristiques de l'Homme et du robot. La méthode a été appliquée à l'optimisation de la morphologie d'un robot pour soutenir une activité de forage (figure 23).

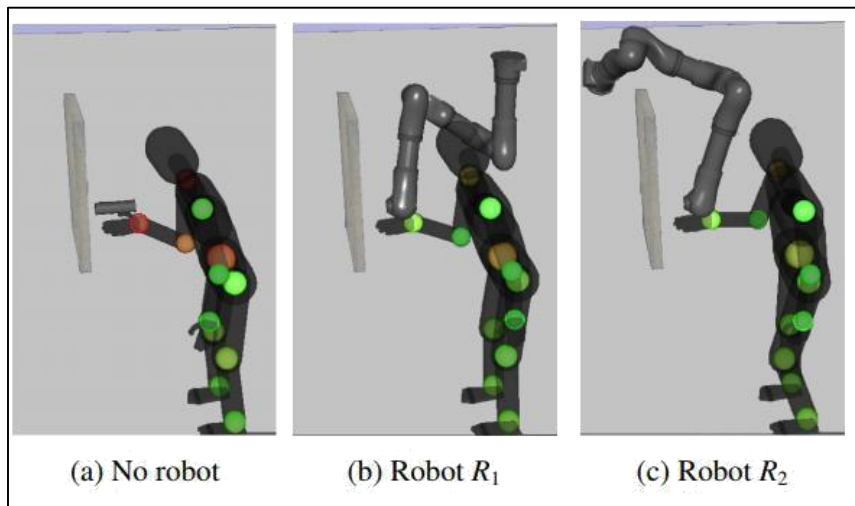


Figure. 23 Vue d'ensemble de l'activité de forage réalisée sans aide et avec l'aide de deux robots collaboratifs différents. Les sphères colorées représentent le niveau d'effort instantané
Maurice et al. (2017)

2.2 L'Acceptabilité d'une nouvelle technologie

L'introduction d'une nouvelle technologie constitue un changement important dans l'organisation et l'activité des opérateurs. L'introduction d'une technologie représente également la génération d'un changement dans un système socio-organisationnel. Bordel et al. (2014) ont illustré qu'aussi optimale que soit une innovation sur le plan technologique, elle n'est efficace que si elle est acceptable du point de vue de l'utilisateur. Afin d'éviter le rejet par les utilisateurs, l'acceptabilité doit être étudiée et traitée en amont des projets de conception.

De nombreux modèles théoriques ont cherché à préciser les déterminants de l'acceptation technologique, le modèle le plus utilisé est le Technology Acceptance Model (TAM) développé par Davis (1989). Ce modèle explique le processus d'acceptabilité par deux principaux facteurs subjectifs : l'utilité perçue et la facilité d'utilisation perçue. Ces deux facteurs influenceraient les attitudes et les intentions d'utilisation de la technologie en conception.

Certaines approches proposent de combiner le TAM avec d'autres paradigmes théoriques pour pallier ses insuffisances. C'est le cas de Dishaw et Strong (1999) qui critiquent le TAM pour son manque d'intérêt pour les tâches réalisées ou à réaliser par les utilisateurs. Ces auteurs proposent d'articuler ce modèle avec une autre approche théorique : le modèle Task Technology Fit (TTF) de Goodhue et Thompson (1995), qui cherche à vérifier si les fonctionnalités des technologies sont en adéquation avec l'activité des utilisateurs. Leurs travaux montrent que la technologie serait mieux acceptée et aurait des effets plus positifs sur les performances individuelles si elle correspond aux tâches attendues.

La notion d'acceptabilité est de plus en plus discutée et abordée dans le contexte de la robotique collaborative. Par exemple, l'INRS (Wioland et al. 2019) a publié les résultats préliminaires d'une étude portant sur l'acceptabilité des exosquelettes par les utilisateurs. Cette étude visait à étudier les parties bloquantes ou facilitantes de l'intégration de ces outils dans l'organisation industrielle, leurs impacts sur la santé des utilisateurs, sur leur sécurité et sur la qualité de l'interaction. Un deuxième exemple est celui de Weistroffer et al. (2014), qui ont utilisé la réalité virtuelle, pour chercher à déterminer les caractéristiques subjectives d'acceptabilité de la collaboration Homme-robot par les opérateurs. Deux types de facteurs ont été considérés dans cette étude, les premiers sont liés aux robots et se concentrent sur leur apparence, leurs mouvements et leur niveau d'intelligence. Les seconds sont liés à l'interaction et concernent la distribution spatiale entre le robot et l'opérateur, la distribution temporelle des tâches, le niveau d'interaction et le niveau de contrôle sur les tâches du robot. Dans le même contexte, Subrin et al. (2019) ont déterminé les facteurs d'acceptabilité d'une solution robotique collaborative pour une opération de polissage de grandes pièces composites. En interrogeant des opérateurs, ils ont souligné 4 facteurs attendus :

- Le contrôle du cobot : il doit permettre à l'opérateur de déplacer facilement le système et de toujours garder le contrôle du travail ;
- L'utilité : le système doit être utile pour aider l'opérateur sans lui enlever son expertise ;
- La facilité d'utilisation : le système doit être facile à utiliser et à apprendre ;

- Impact sur le travail : le système doit permettre d'atteindre la qualité du travail de l'opérateur dans un temps acceptable.

2.3 L'Utilisabilité d'une nouvelle technologie

Selon la norme ISO 9241-11, l'utilisabilité est "la mesure dans laquelle un produit peut être utilisé par des utilisateurs spécifiés pour atteindre des objectifs spécifiés avec efficacité, efficience et satisfaction dans un contexte d'utilisation spécifié".

Des questionnaires et des échelles sont utilisés pour recueillir les opinions des utilisateurs sur la facilité d'utilisation, la satisfaction et l'expérience liées à l'interaction avec un système technologique. Allant de 2 à plus de 100 questions, ces outils sont adaptés à un type ou à différents types de produits et peuvent étudier plusieurs dimensions en tenant compte de l'évaluation subjective des utilisateurs potentiels. A titre d'exemple, nous citons l'échelle EUCS (End-User Computing Satisfaction) proposée par Doll et Torkzadeh (1988), composée de 12 questions et dédiée à l'évaluation des sites web. ASQ (After Scenario Questionnaire) développée par Lewis (1995), composée de 3 questions et dédiée à l'évaluation de tout type de produits. L'échelle de mesure de l'utilisabilité perçue des sites Web développée par Wang et Senecal (2007), composée de 8 questions et axée sur les sites Web. UMUX (Usability Metric for User Experience) développée par Finstad (2010), composée de seulement 4 questions et adaptée à tout type de système. SUS (System Usability Scale), une des échelles les plus utilisées, proposée par Brooke (1996, 2013), elle vise à évaluer l'utilisabilité de tout type de système par ses futurs utilisateurs, composée de 10 questions, dont 5 inversées (figure 24).

The System Usability Scale Standard Version		Strongly disagree	1	2	3	4	5	Strongly agree
1	I think that I would like to use this system.		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2	I found the system unnecessarily complex.		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3	I thought the system was easy to use.		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4	I think that I would need the support of a technical person to be able to use this system.		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5	I found the various functions in the system were well integrated.		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6	I thought there was too much inconsistency in this system.		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7	I would imagine that most people would learn to use this system very quickly.		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
8	I found the system very cumbersome to use.		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
9	I felt very confident using the system.		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
10	I needed to learn a lot of things before I could get going with this system.		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figure. 24 Echelle SUS par Brooke (2013)

L'échelle SUS permet de calculer un score, dit : score d'utilisabilité et obtenir une note sur 100 :

- Pour les items 1, 3, 5, 7 et 9, soustraire 1 de chaque score ;

- Pour les éléments 2, 4, 6, 8 et 10, calculez 5 - (moins) chaque score ;
- Calculez la somme des 10 scores ;
- Multiplier la somme par 2,5.

Au cours des projets de conception, on peut distinguer trois temps de collecte et d'analyse de la trajectoire d'utilisabilité (Quiguer 2013). Avant l'utilisation, avant même que la personne ait pu manipuler le dispositif, l'étude de l'acceptabilité, qui a été introduite dans la section 2.3, vise à prédire l'utilisation potentielle d'une technologie à partir des représentations subjectives des futurs utilisateurs. Une fois le système développé, une deuxième étape de l'étude se concentre sur la compréhension de ce qui va déterminer l'acceptation de la technologie.

Enfin, une fois le système implémenté, il est important de s'intéresser à son appropriation par les utilisateurs et de s'interroger sur leur satisfaction quant à son utilisation dans l'activité quotidienne. En fonction de ces évaluations, l'évolution du système doit être étudiée pour éviter un rejet par les utilisateurs après investissement.

Les exemples d'indicateurs présentés dans cette section visent à permettre la prise en compte des enjeux essentiels liés à la conception des systèmes humains-robots. Les différents indicateurs centrés sur l'humain mettent en évidence des dimensions fondamentales à prendre en compte avant d'investir dans des cellules robotiques coûteuses. Ces dimensions englobent l'acceptabilité, la facilité d'utilisation et l'utilité perçue. La prise en compte de ces dimensions permettrait d'éviter le rejet du cobot par les utilisateurs après l'investissement.

2.4 Synthèse et comparaison des méthodologies présentées

A travers les sections précédentes, nous avons présenté et discuté plusieurs méthodologies et approches de conception s'intéressant à l'intégration des futurs utilisateurs lors du processus de conception. Ces méthodologies, issues de disciplines différentes, intègrent les dimensions liées aux facteurs humains de façons différentes, et avec des degrés d'implication des utilisateurs différents. Le tableau suivant compare les principaux moments et le degré d'intégration des utilisateurs selon les méthodologies et approches présentées.

Méthodologie ou modèle de conception	Référence(s)	Moments PRINCIPAUX d'implication des futurs utilisateurs			Degré d'implication des futurs utilisateurs
		Analyse de l'existant	Conception du système	Evaluation du système	
Conception centrée utilisateur	ISO 9241 (2010)	×	×	×	Très important
Design Thinking	Mathieu et Hillen (2016)	×	×		Important
L'ergonomie de l'activité	Garrigou et al. (1994), Benchekroun (2015)	×	×	×	Très important
Human Integration Readiness Levels	Moulières-Seban (2017)	×	×	×	Très important
Modèle en cascade	Boehm (1981)	×			Très faible
Modèle en V adapté	Coutaz (1987)			×	Faible
Modèle en Spirale	Boehm (1984)			×	Faible
Cycle de conception des interfaces utilisateurs	Hartson et Boehm-Davis (1993)	×	×	×	Important
L'analyse cognitive du travail (CWA)	Rasmussen et al. (1987), Woods (2005)	×	×		Très important
Méthode en U	Millot (1990)	×		×	Très important
Processus de conception traduisant l'articulation ergonomie-conception	Sagot (2005)	×	×	×	Très important
Modèle en étoile	Hix et Harston (1993)			×	Faible

Tableau 2. Tableau de synthèse des méthodologies et approches discutées

3. Proposition méthodologique 1 : Vers un cadre méthodologique de conception des systèmes Humains-Robots

En se basant sur la richesse des disciplines de conception centrées sur l'humain présentées précédemment, sur la connaissance des éléments technologiques de la robotique collaborative et de la réglementation en vigueur, nous proposons dans cette partie un cadre méthodologique de conception des systèmes humains-robots. Ce cadre méthodologique vise à aider les concepteurs des systèmes cobotiques à mieux prendre en compte les différents enjeux liés à cette technologie, dans un objectif d'aboutir à des systèmes humains-robots alliant sécurité, acceptabilité et performance.

Avant de commencer la présentation des étapes de conception, pour veiller à la bonne prise en compte de l'aspect multi-enjeux précité, l'équipe de projet devra être pluridisciplinaire. C'est d'ailleurs une des bases de la conception centrée-utilisateurs (section 1.1). Une équipe de projet pluridisciplinaire devrait inclure, entre autres, les opérateurs concernés par le projet, des représentants de la direction (pour la discussion de l'investissement), des managers (de production, de maintenance, de qualité, de la sécurité), un ergonome et un intégrateur de robot.

Au début du projet, l'équipe pluridisciplinaire serait amenée à analyser la situation actuelle de l'organisation, du poste de travail et des tâches à cobotiser. Plus précisément, il s'agira, d'une part d'analyser les enjeux du projet en définissant les objectifs, en identifiant les postes à cobotiser, les personnes impactées, leurs attentes et les contraintes économiques et organisationnelles liées au projet (budget, importance du poste dans le processus de production, etc.), et d'une autre part, d'analyser l'activité des opérateurs à travers des observations en situation réelle, des entretiens de compréhension et une analyse des données et documents liés aux postes de travail concernés (descriptifs des postes, objectifs de performance, suivi de productivité et de qualité, données de santé et de sécurité, etc.).

En se basant sur les résultats de la phase d'analyse de l'existant, les étapes de conception devront être conduites de manière participative et itérative (principes de la conception centrée utilisateurs : section 1.1), en commençant par une étape importante d'idéation de scénarios de cobotisation (comme au Design Thinking : section 1.2). Cette étape essentielle va contribuer à favoriser l'approche participative en donnant la parole à tous les membres de l'équipe de conception, y compris les opérateurs, pour proposer des pistes de solutions qui doivent être discutées, évaluées et hiérarchisées.

Ensuite, les pistes de solutions les mieux classées doivent être étudiées, afin de déterminer leurs faisabilités et d'estimer leurs enveloppes budgétaires. Si les principes de solutions et leurs coûts potentiels sont acceptés par l'organisation et les opérateurs concernés, une étape de simulation fonctionnelle (tirant bénéfice des nouvelles technologies de visite virtuelle et des logiciels de simulation) permettrait l'évaluation du fonctionnement spatial et temporel de la solution, et d'estimer son impact potentiel sur la performance du système.

Après l'étude de faisabilité et l'évaluation de la rentabilité économique de l'investissement, une étape d'analyse des risques et d'évaluation de l'utilisabilité et de l'acceptabilité de la solution par les futurs utilisateurs est nécessaire pour déterminer si la solution est potentiellement convenable et mérite d'être prototypée, ou s'il y a une nécessité de faire des itérations pour améliorer des aspects de la solution.

Ces itérations et retours vers la phase d'étude de faisabilité pour modifier la solution proposée, ou vers la phase d'idéation, pour revoir les scénarios de cobotisation doivent être envisageables pour éviter d'aller vite vers des investissements inutiles. Même après la validation d'une solution finale et son implantation, des évaluations après la mise en fonctionnement permettront de recueillir le retour des utilisateurs et la prise des décisions nécessaires pour éviter tout rejet de la nouvelle technologie après investissement.

Les étapes présentées ci-dessus sont schématisées sous forme d'un cadre méthodologique de conduite du processus de conception des systèmes cobotiques (figure 25). Ce cadre méthodologique vise à orienter vers des systèmes humains-robots alliant sécurité, acceptabilité et performance.

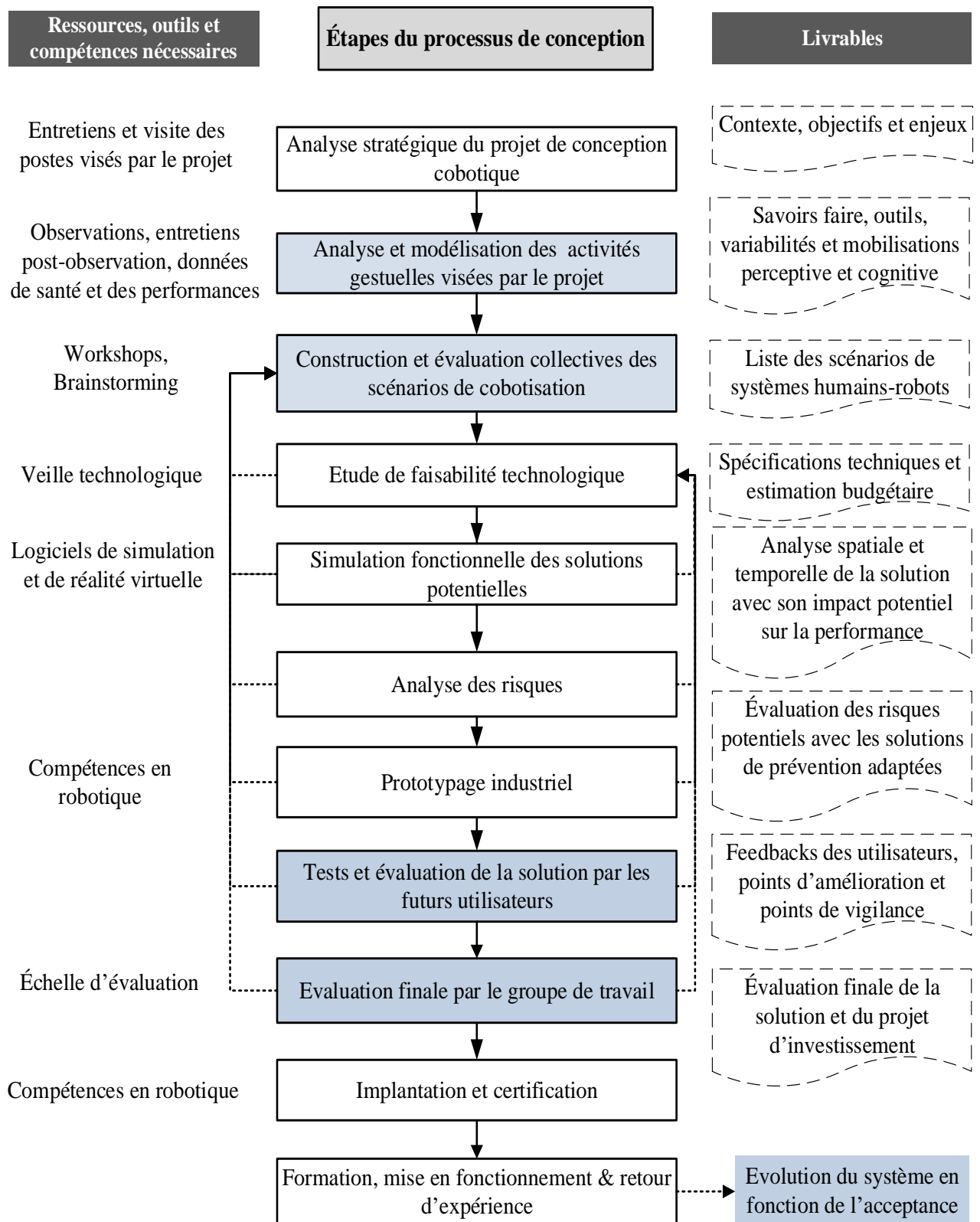


Figure 25. Proposition de cadre méthodologique de conduite des processus de conception des systèmes cobotiques (intégrant des étapes visant la prise en compte des dimensions humaines : les étapes colorées en bleu)

4. Proposition méthodologique 2 : Vers une approche ergonomique d'analyse du travail dans une perspective de cobotisation

Les étapes d'analyse stratégique du projet de conception cobotique et d'analyse et modélisation des activités gestuelles visées par le projet sont des étapes déterminantes durant les projets de transformation englobant des robots collaboratifs. En effet, ces étapes vont impacter toute la suite du projet. Elles vont orienter vers les tâches à cobotiser, ils vont déterminer le niveau d'investissement des différents acteurs dans le projet, et donc le niveau d'acceptabilité du futur système par l'organisation actuelle.

À travers cette partie, nous formalisons une approche d'analyse du travail dans une perspective de cobotisation. Cette approche repose sur trois phases distinctes et complémentaires lors des étapes d'analyse :

- 1^{ère} phase : une phase d'analyse stratégique du projet ;
- 2^{ème} phase : une phase de diagnostic des activités humaines ;
- 3^{ème} phase : une phase d'allocation des tâches humains-cobots et de formalisation des pistes d'assistance.

Lors de la 1^{ère} phase, à travers des entretiens avec l'équipe de direction, l'équipe intervenante doit comprendre les objectifs du projet, ainsi que ses enjeux, se mettre d'accord sur l'approche méthodologique, identifier les opérateurs concernés par le projet, chercher à comprendre leurs activités au niveau de leurs postes de travail, et définir un échantillon d'opérations à observer et à analyser en fonction de la complexité des produits et de l'expérience des opérateurs.

La 2^{ème} phase consiste à construire des diagnostics sur la base de l'observation des activités réelles mobilisées par les opérateurs concernés par le projet, s'entretenir avec les opérateurs pour comprendre le travail effectué, les savoirs-faire mobilisés, les sources de variabilités, les difficultés rencontrées, les points de vigilances, etc.

La 3^{ème} phase consiste d'abord à analyser les données collectées, à proposer et discuter la synthèse du travail observé. Elle vise ensuite à proposer et discuter des scénarios d'assistance et de cobotisation.

Les étapes ci-dessus sont résumées en figure 26.

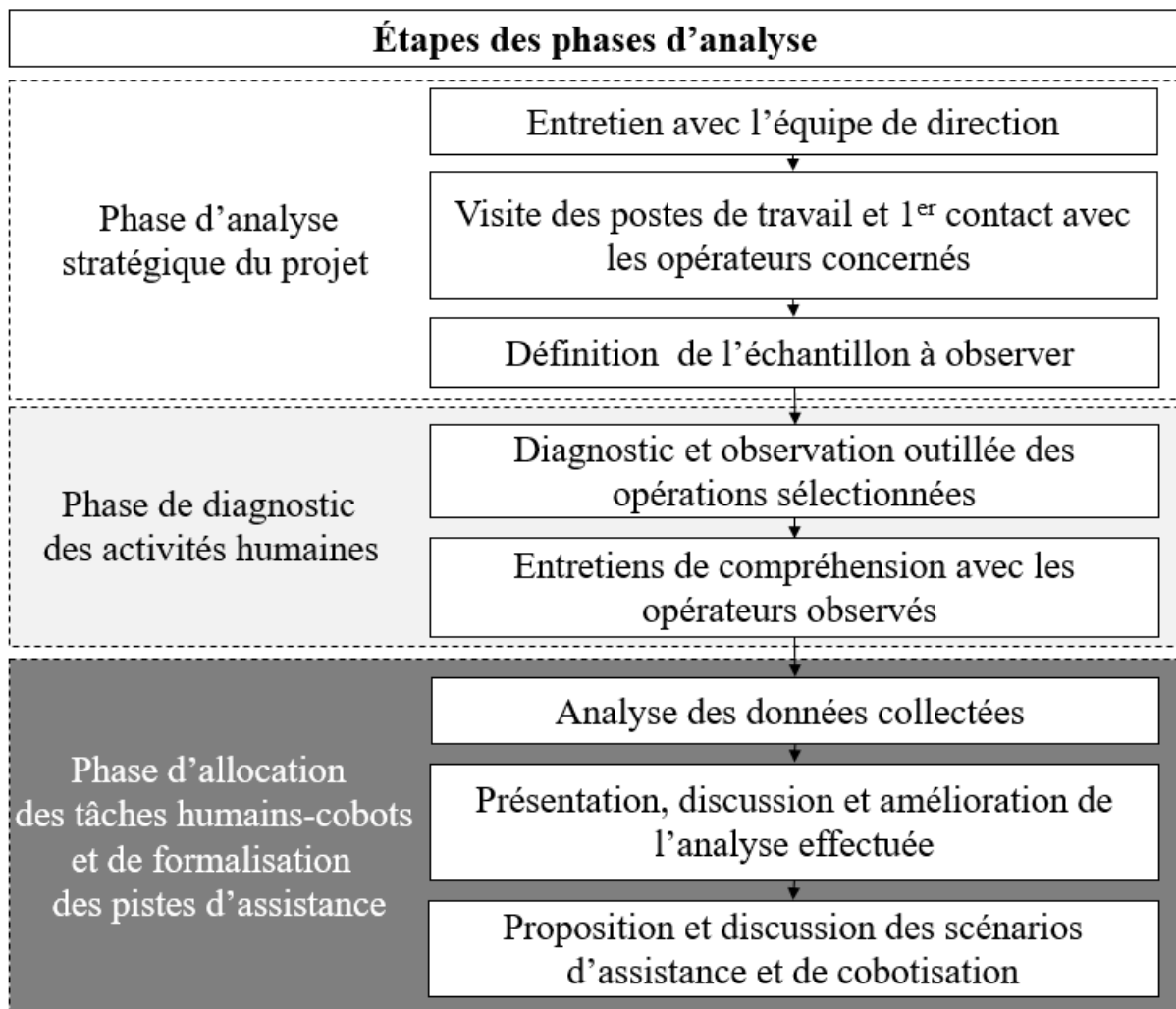


Figure 26. Approche ergonomique d'analyse du travail dans une perspective de cobotisation

5. Proposition méthodologique 3 : Vers une méthodologie d'évaluation des solutions cobotiques

Les étapes d'évaluation ont un rôle primordial durant le processus de conception des systèmes cobotiques. Ces étapes permettront de s'assurer que les principes de solutions sont en adéquation avec les exigences du poste et de la variabilité du travail de tous les jours. Elles permettront également de s'assurer de la rentabilité de l'investissement dans ces projets. Nous pouvons distinguer deux principaux moments d'évaluation durant les processus de conception des systèmes cobotiques : l'évaluation des scénarios de cobotisation et l'évaluation des solutions finales développées.

5.1 L'évaluation des scénarios et pistes de solution

Après l'analyse des activités gestuelles et la construction collective des scénarios de cobotisation, l'équipe de conception doit se retrouver avec une ou plusieurs tâches à assister et des principes d'assistance, qui consistent à une répartition des tâches entre opérateurs humains et robots, et les propositions du mode de pilotage et d'interface de commande (prise manuelle, joystick, interprétation des gestes, commande vocale, etc.). Ces propositions doivent être évaluées et hiérarchisées en prenant en compte les exigences de poste, la maturité des solutions technologiques en question, les partenariats possibles qui peuvent faciliter l'étude de faisabilité et le prototypage (fournisseurs robotiques, laboratoires de recherche, intégrateurs de robots, etc.), le coût total, la maintenabilité probable du futur système (facilité et compétences nécessaires) et les risques potentiels. Le tableau 3 présente une proposition d'échelle résumant ces indicateurs. À ce stade du processus, il est difficile d'estimer la performance du futur système ; cet indicateur doit être pris en compte après l'étude de faisabilité.

Critères	Importance (de 1 à 5)	Principe de solution 1	Principe de solution 2	Principe de solution n	Nombre de Points
Ergonomie (exigences du poste, finesse de la commande, etc.)					
Maturité des solutions					
Partenariats possibles					
Coût total					
Maintenabilité (facilité & compétences)					
Sécurité (risques)					

Tableau 3. Proposition d'échelle d'hiérarchisation des principes de solutions cobotiques

5.2 L'évaluation finale des solutions de systèmes cobotiques

Après l'étude de faisabilité, le développement de la solution et son prototypage, l'équipe de conception se retrouvera avec une ou plusieurs solutions fonctionnelles prototypées. Ces solutions doivent être d'abord testées par les futurs utilisateurs et évaluées pour permettre à la direction de l'entreprise de prendre la décision d'investir ou non dans le système cobotique développé. Pour s'assurer que le choix soit rentable et que la solution mise en place ne soit pas rejetée après l'investissement, 3 types d'indicateurs doivent être pris en compte : « les facteurs humains », le retour sur investissement économique (coût total et impact sur la performance : productivité, qualité, et maintenabilité du futur système) et la sécurité des futurs utilisateurs.

L'évaluation du retour sur investissement économique est faisable à travers des essais du prototype et la comparaison des résultats de ces essais avec les résultats du système initial.

L'évaluation de la sécurité est effectuée à travers l'analyse des risques, qui permet d'identifier l'ensemble des points dangereux en lien avec l'utilisation potentielle de la solution et de proposer les mesures de prévention adaptées pour les éviter. Si ces deux indicateurs sont relativement faciles à évaluer, l'évaluation des facteurs humains est très subjective et difficilement chiffrable.

Nous proposons dans cette section un indicateur de choix subjectif qui prend en compte les principales dimensions liées aux « facteurs humains » discutées en section 2. Cet indicateur, que nous appellerons **ICS** pour **Indicateur de choix subjectif**, se compose de 4 dimensions subjectives évaluées à travers une échelle qui doit être remplie par les futurs utilisateurs après des sessions de test consistant en une simulation du travail futur avec les prototypes développés. Ces 4 dimensions sont :

- La facilité d'utilisation ;
- L'utilité perçue ;
- La sécurité perçue ;
- L'acceptabilité potentielle.

Ces 4 dimensions subjectives, peuvent être recueillies avec l'échelle proposée en tableau 4, qui se compose des 4 affirmations suivantes :

Affirmations	0%	25%	50%	75%	100%
A1: La solution testée est facile à utiliser et à apprendre					
A2 : La solution testée a facilité mon travail et m'a aidé à réaliser un travail de qualité					
A3 : Je me suis senti en sécurité en testant cette solution					
A4 : Je voudrais travailler en utilisant cette solution					

Tableau 4. Proposition d'échelle pour recueillir le ressenti subjectif des futurs utilisateurs

Ensuite, en considérant que les 4 affirmations reflétant la facilité d'utilisation (A1), l'utilité perçue (A2), la sécurité perçue (A3) et l'acceptabilité potentielle (A4) ont le même niveau d'importance, la moyenne des % obtenus est notre proposition d'indicateur de choix subjectif des nouvelles solutions technologiques (ICS).

Conclusion

La cobotique présente de nombreuses perspectives pour le secteur industriel, englobant l'amélioration de l'agilité des systèmes de production et l'amélioration des conditions de travail des opérateurs humains. Ces nouveaux moyens technologiques ont engendré des débats qui reflètent l'aspect multi-enjeux de cette nouvelle technologie (sécurité, performance et conditions de travail). Cet aspect multi-enjeux confirme le besoin de contributions méthodologiques de conduite des processus de conception centrées sur l'humain et prenant en compte les différents enjeux liés à la cobotique.

Dans ce chapitre, différentes approches de conception centrées sur les utilisateurs ont été présentées. Ensuite, un cadre méthodologique de conception des systèmes humains-robots s'inspirant de ces méthodologies et prenant en compte les exigences de ce nouveau contexte a été élaboré. Ce cadre méthodologique, comprenant les étapes de conception avec leurs livrables, leurs outils et données d'entrées nécessaires, met en avant l'importance de la structuration participative de l'équipe de conception, des étapes préliminaires de compréhension et d'analyse des activités humaines et des étapes itératives de conception et d'évaluation pour parvenir à une conception combinant performance productive, santé et sécurité.

Pour réussir les étapes d'analyse du système existant et d'évaluation des solutions cobotiques potentielles, nous avons proposé dans ce chapitre une méthode ergonomique d'analyse du travail dans une perspective de cobotisation et deux échelles d'aide à l'évaluation qui visent à s'assurer que l'ensemble des dimensions liées au projet cobotique sont effectivement prises en compte, y compris les dimensions liées aux futurs utilisateurs.

Ces propositions méthodologiques ont été mises en pratique pour répondre à un besoin d'assistance d'un poste de recyclage de boîtes plastiques contenant des produits de nettoyage (produits chimiques). Le contexte de ce cas d'étude, les étapes effectuées et les résultats obtenus sont présentés à travers le chapitre suivant.

Chapitre 3

Cas d'étude d'assistance d'un poste de recyclage des boites

Introduction

Dans le chapitre précédent, 3 propositions méthodologiques visant à assister les concepteurs des systèmes cobotiques ont été développées. Ces propositions méthodologiques ont été mises en pratique dans le cadre de deux cas d'étude complémentaires.

Ce chapitre présente le premier cas d'application des apports méthodologiques proposés dans le cadre de cette thèse de doctorat. Il s'agit d'un cas d'étude inspiré par une problématique industrielle, et effectué dans des conditions de laboratoire. Le contexte de ce cas d'étude, le déroulement des étapes, les choix effectués, les difficultés rencontrées et les résultats obtenus sont présentés dans ce chapitre.

1. Cadre et objectif du cas d'étude

Ce cas d'étude en conditions de laboratoire s'inspire d'un poste de travail industriel de recyclage de boîtes contenant un produit chimique utilisé pour le nettoyage. Après chaque démarrage d'une nouvelle production, un ensemble de boîtes est éliminé et recyclé pour éviter toute non-conformité concernant la quantité de produits ou la qualité de l'emballage. L'opération de recyclage consiste à collecter le produit de nettoyage (sous forme de dosettes) et à stocker les boîtes vides. Pour ouvrir les boîtes, les opérateurs doivent couper l'emballage et appuyer sur deux boutons poussoirs en plastique (figure 27). Ce cas d'étude visait à investiguer l'apport des solutions technologiques (y compris la robotique collaborative) dans l'objectif d'assistance de ces opérations de recyclage.



Figure 27. Photo des boîtes à recycler

Pour étudier correctement ce problème et développer des solutions d'assistance appropriées, un travail d'analyse des opérations actuelles a nécessité la reproduction du poste de travail industriel aux conditions de laboratoire (figure 28). Ceci a permis de prendre le temps nécessaire afin de mener des analyses, des évaluations et d'entreprendre plusieurs itérations lors des étapes du développement des solutions d'assistance.

Le fonctionnement actuel a été analysé à travers des observations et des entretiens avec les opérateurs (volontaires du laboratoire de recherche appelés dans ce manuscrit de thèse par « opérateurs volontaires »). Puis, des scénarios d'amélioration ont été proposés, discutés et hiérarchisés. Par la suite, une étude de faisabilité a été menée et a conduit au développement de plusieurs prototypes industriels. Ces prototypes ont été évalués par des opérateurs volontaires.

Ces étapes d'analyse et de conception, réalisées par une équipe de travail aux compétences pluridisciplinaires (robotique, ergonomie, génie industriel), sont présentées dans cette section.

2. Illustration de la proposition méthodologique par le cas d'étude : Déroulement et résultats

2.1. Analyse et modélisation des opérations gestuelles visées par le projet

Les rebuts de la chaîne de production sont collectés dans des cartons et stockés dans une zone dite de stockage. L'opérateur volontaire vient prendre un carton de trois boîtes et le ramène au poste de travail, il ouvre les cartons et vide les dosettes du produit dans un conteneur dédié. Une fois les boîtes vidées, l'opérateur doit les empiler et les placer vers la zone de stockage des cartons vides (figure 28). Ces opérations peuvent être énumérées comme suit :

- O1 : déplacer les cartons de la zone de stockage vers la zone d'approvisionnement du poste de travail ;
- O2 : déplacer un carton à proximité des conteneurs de produit et d'emballage ;
- O3 : ouvrir le carton ;
- O4 : prendre et ouvrir les boîtes en appuyant sur les deux boutons poussoirs ;
- O5 : placer les dosettes de produit dans le conteneur dédié ;
- O6 : empiler les boîtes vides sur la table ;
- O7 : jetez le carton dans le conteneur des déchets d'emballage ;
- O8 : déplacer les boîtes vides empilées vers la zone de stockage des boîtes vides.

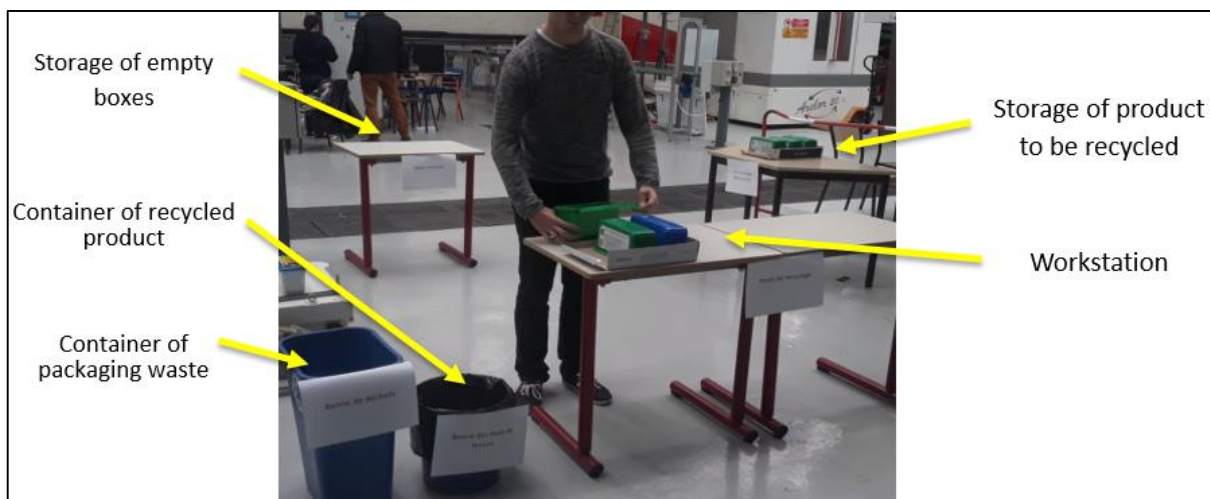


Figure 28. Image du poste de travail aux conditions du laboratoire

L'organisation spatiale de ces opérations est représentée en figure 29.

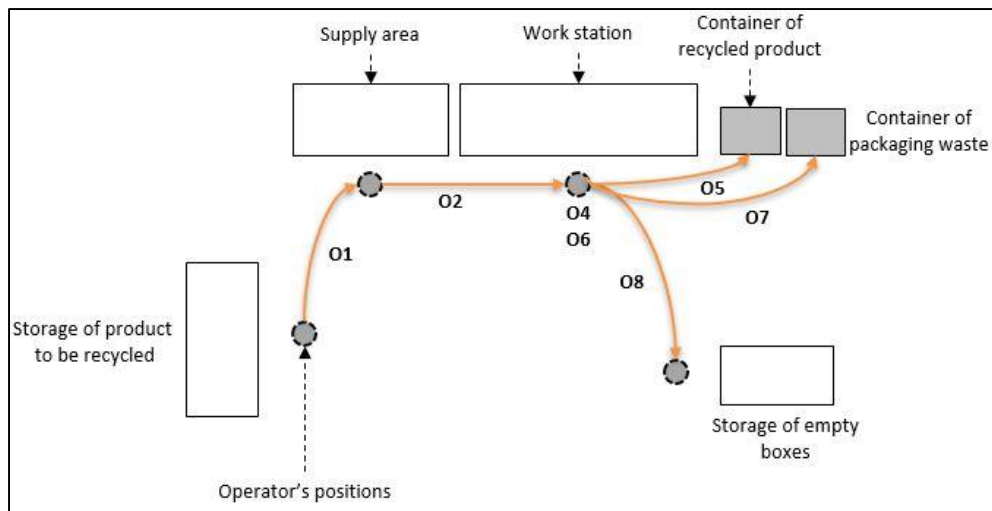


Figure 29. L'organisation spatiale des opérations de recyclage

Pour comprendre les difficultés rencontrées lors de ces opérations, nous avons observé les opérations lors des séances de recyclage par les opérateurs volontaires. Ces séances ont été suivies par des entretiens systématiques. L'objectif était de savoir s'il existait des opérations contraignantes ou pénibles, des contraintes de temps, ou des propositions d'amélioration.

Sur la base de cette étape d'analyse des opérations, l'opération "O4" consistant à ouvrir les boîtes s'est avérée être l'opération la plus contraignante. Les opérateurs doivent travailler à la fois rapidement (objectif de productivité) et précisément (appuyer sur les deux boutons pour ouvrir la boîte). Ceci est particulièrement visible à travers la variété des méthodes appliquées pour réaliser cette opération. Par moments, l'opérateur volontaire pose la boîte sur son poste de travail et appuie à deux mains sur les deux boutons pour ouvrir la boîte. Dans d'autres moments, il porte la boîte et appuie à deux mains sur les deux boutons poussoirs ; ou encore, il la porte d'une main et appuie sur les deux boutons de l'autre main (figure 30). Les entretiens post-observation ont confirmé cette observation. En effet, la plupart des volontaires ont noté que cette opération n'est pas fluide contrairement aux autres opérations.

Au cours de cette étape, la productivité de chaque opérateur volontaire a été mesurée. La productivité moyenne est d'environ 6 boîtes recyclées par minute.

Tout au long de cette étude de cas, nous parlerons « d'analyse des opérations » dans des conditions de laboratoire, et non de « l'analyse de l'activité » dans un contexte industriel avec toutes ses contraintes de délais, de coûts et de qualité.



Figure 30. La variété des gestes appliqués pour l'ouverture des boîtes

2.2. Construction collective et évaluation de scénarios de cobotisation

Sur la base des résultats de l'analyse des opérations, une étape d'idéation a été organisée. Cette étape a été organisée sous forme d'une réunion de présentation des résultats d'analyse, suivie d'une phase de proposition des solutions pour assister les opérations de recyclage. À cet égard, deux idées principales ont été proposées :

- La conception et la fabrication d'un outil manuel pour aider à l'ouverture des boîtes (l'opération la plus contraignante) ;
- Le développement d'une cellule robotique collaborative, où le robot se chargera de l'opération la plus contraignante ou prendra en charge quelques opérations pour soulager les opérateurs.

Après cette étape d'idéation, une étude de faisabilité a été réalisée pour traduire ces idées en solutions technologiques.

Lors de cette étape, et dans l'objectif de ne pas éliminer rapidement l'une des deux possibilités, nous avons décidé d'étudier les deux pistes de solution. Nous avons commencé par étudier la 1^{ère} option : la conception d'un outil manuel pour faciliter l'O4.

Nous avons réussi à concevoir un outil adapté à l'ouverture des boîtes en utilisant le logiciel de conception mécanique Catia. L'outil désigné a ensuite été fabriqué à l'aide d'une imprimante 3D au sein du laboratoire LISPEN⁹ d'Arts et Métiers Institut de Technologie (figure 31).



Figure 31. L'outil conçu pour ouvrir les boîtes

Après le développement et les premiers tests de cette solution, l'équipe s'est concentrée sur le développement d'un scénario de collaboration humain-robot pour assister les opérations de recyclage.

L'étape de répartition des tâches a suscité de nombreuses discussions entre les membres de l'équipe de conception. Le premier scénario qui a retenu l'attention de la majorité des participants est présenté dans le tableau 5. L'idée de cette proposition d'allocation des tâches est d'allouer l'opération 4, l'opération la plus contraignante selon l'étape d'analyse des opérations, au robot. Pour optimiser l'utilisation du robot, les opérations effectuées juste après l'opération 4 ont été également allouées au robot.

⁹ LISPEN : Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Physiques Et Numériques (Arts et Métiers Institut de Technologie de Lille –France)

Tâches allouées à l'opérateur humain	Tâches allouées au robot
O1 : Déplacer les cartons de la zone de stockage vers la zone d'approvisionnement du poste de travail	
O2 : Déplacer un carton à proximité des conteneurs	
O3 : Ouvrir le carton et préparez les boîtes à être traitées par le robot	
	O4 : Prendre et ouvrir les boîtes
	O5 : Mettre les dosettes de produit dans le conteneur dédié
	O6 : Empiler les boîtes ouvertes sur la table
O7 : Jetez le carton dans le conteneur des déchets d'emballage	
O8 : Déplacer les boîtes vides empilées vers la zone de stockage des boîtes vides	

Tableau 5. 1ère proposition d'allocation des tâches entre humain-robot

2.3. Étude de faisabilité technologique

Après la proposition du scénario d'allocation des tâches, le défi de cette phase du processus de conception consistait à développer une solution technique cobotique pour assister le poste du recyclage.

Le choix du robot adéquat ne représente pas l'étape la plus importante lors des processus de conception des cellules robotiques. En fait, grâce au large choix de robots collaboratifs en termes de portée, de charge utile, de précision et de degrés de liberté, plusieurs robots peuvent répondre à ces besoins techniques (charge, portée, degrés de liberté, etc.). Cependant, le choix ou la conception de l'effecteur n'est pas toujours facile. En effet, aucune référence d'effecteur prête à l'emploi n'a été trouvée chez les fournisseurs des dispositifs robotiques adaptée à ouvrir ce type de boîtes.

Plusieurs expériences ont conduit au principe de solution suivant : le robot va porter les boîtes à partir de leur face inférieure en utilisant un simple effecteur sous forme de pince à deux doigts, et les ouvrir par contact contre un support fixe adapté.

Afin de faciliter les opérations du robot, des pièces mécaniques ont été conçues et fabriquées à l'aide d'une imprimante 3D. Il s'agit notamment d'une pièce en plastique pour couper le ruban adhésif qui ferme les boîtes (figure 32. A), d'un support pour empiler les boîtes vidées (figure

32. B) et d'un support de guidage pour assurer la position exacte prévue des boîtes à recycler par le robot (figure 32. C).

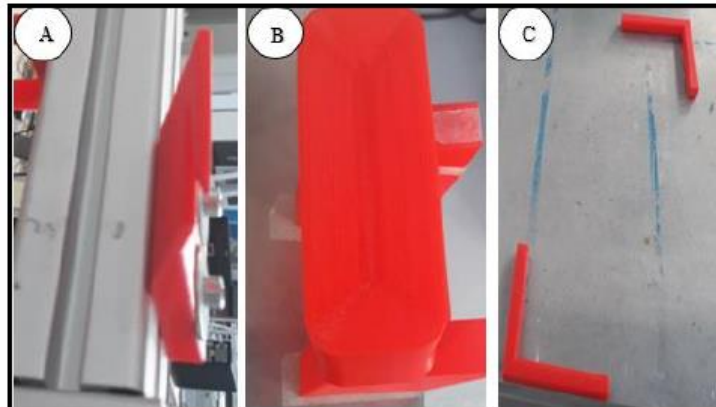


Figure 32. Pièces mécaniques conçues pour améliorer la solution

2.4. Simulation fonctionnelle et analyse des risques

Afin de s'assurer de la pertinence de la solution en développement et de l'ajuster si besoin, une étape de simulation a été entamée en utilisant le logiciel V-REP¹⁰ (figure 33).

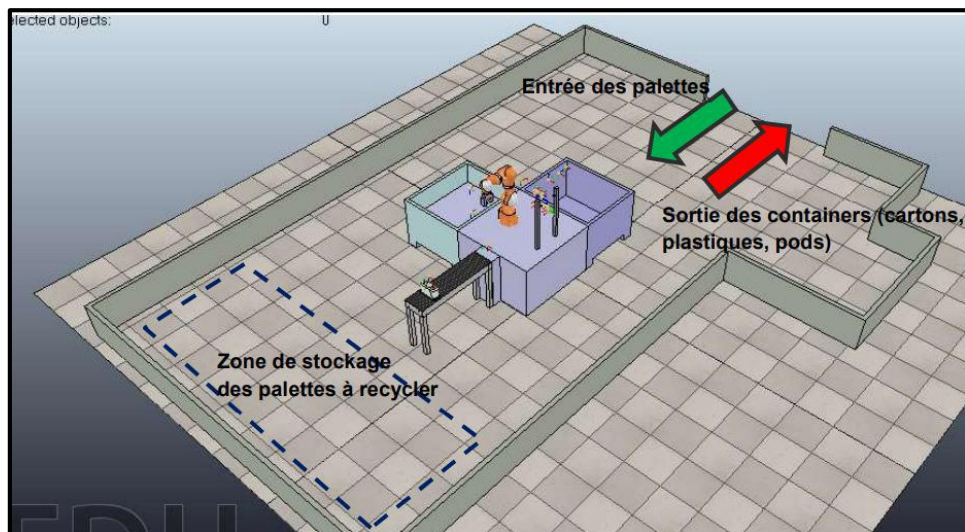


Figure 33. Simulation de la solution développée à l'aide du logiciel V-REP

Cette étape a permis d'améliorer la représentation de la solution et de prédire le fonctionnement spatio-temporel du futur système. C'était l'occasion de prédire les risques liés aux éléments de la cellule robotique et de les éviter à travers la prise de mesures organisationnelles préventives.

Entre autres, cette étape a permis la précision de la position des conteneurs des produits recyclés, de la zone de stockage des boîtes à recycler et du sens de circulation des opérateurs humains. En plus de la dimension faisabilité technique, ces choix ont visé également à réduire

¹⁰ V-REP est un simulateur de robot 3D

les risques de collision avec le robot et la proximité des opérateurs avec la pièce tranchante utilisée pour couper le ruban adhésif des boîtes à recycler.

En plus de ces mesures, l'adoption du plastique comme matériau de fabrication de la pièce tranchante est une mesure impliquée par les raisons de sécurité. Pour éviter le risque de collision, des capteurs de présence ont été choisis pour permettre la surveillance de la zone de travail du robot et pour l'arrêter en cas de présence d'un humain dans une zone dangereuse.

Après les étapes de simulation fonctionnelle et d'analyse des risques, un prototype industriel a été développé pour tester la pertinence de la solution et s'assurer de la sécurité des futurs utilisateurs.

2.5. Prototypage industriel

Comme l'illustre la figure 34, le 1er prototype industriel a permis de tester la solution développée. Pour commencer, l'opérateur humain prépare les boîtes dans un endroit précis, le robot vient les récupérer (figure 34, partie 1). Ensuite, le robot coupe le ruban adhésif de la boîte à travers le contact avec la pièce tranchante (figure 34, partie 2), il l'ouvre (figure 34, partie 3), et la vide dans un conteneur dédié (figure 34, partie 4). Par la suite, le robot empile les boîtes vides pendant que l'opérateur prépare de nouvelles boîtes (figure 34, partie 5). Ainsi, le cycle recommence (figure 34, partie 6).

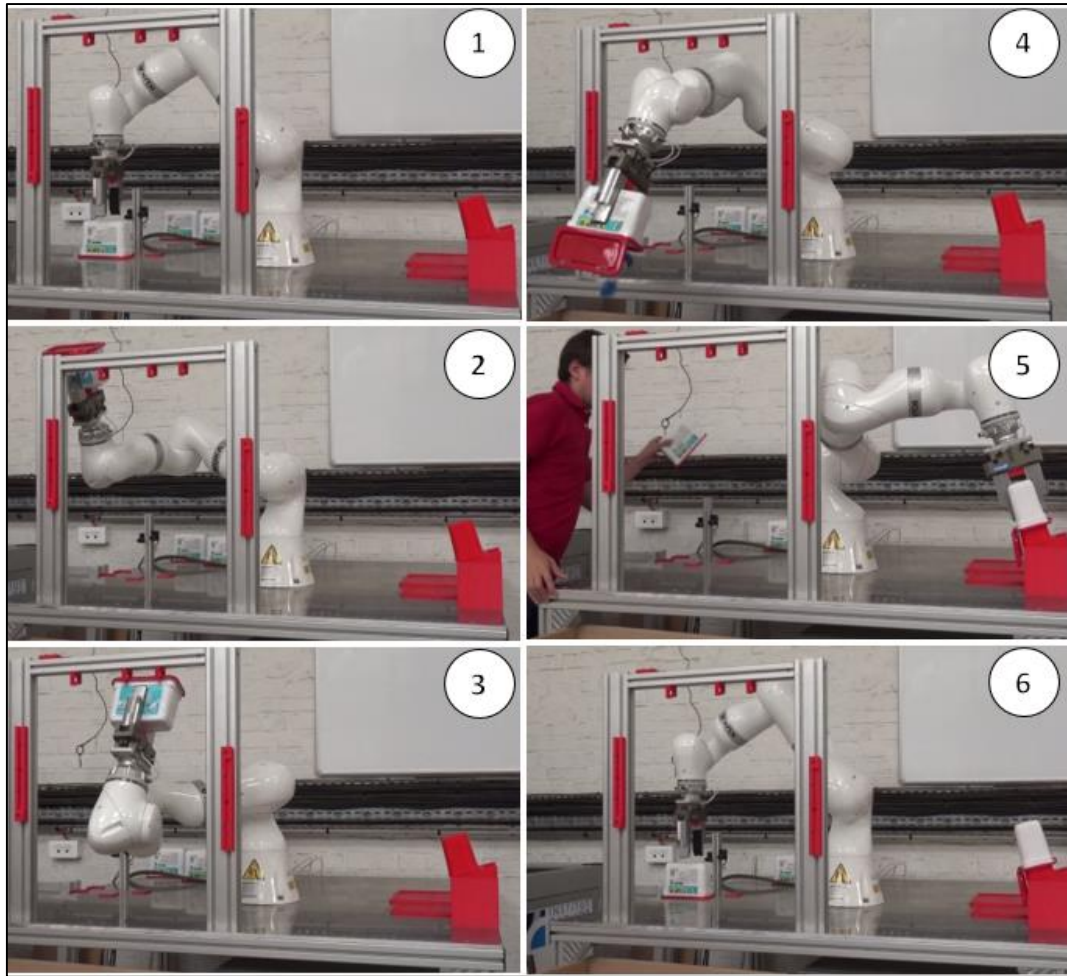


Figure 34. Images du premier prototype industriel développé

Après le développement et le test de cette solution cobotique, l'équipe a constaté que le degré d'interaction entre Homme et robot lors de ce scénario d'assistance est faible, et qu'il est possible de développer un scénario plus interactif. Les discussions ont abouti à une nouvelle répartition des tâches présentée en tableau 6.

Tâches allouées à l'opérateur humain	Tâches allouées au robot
O1 : Déplacer les cartons de la zone de stockage vers la zone d'approvisionnement du poste de travail	
O2 : Déplacer un carton à proximité des conteneurs	
O3 : Ouvrir le carton et préparez les boîtes à être traitées par le robot	
O4 : Ouvrir la boîte et toucher le robot (signe de disponibilité de la boîte)	
	O5 : Placer les dosettes de produit dans le conteneur dédié
	O6 : Remettre les boîtes vides à l'opérateur
O8 : Empiler les boîtes vides sur la table	
O7 : Jeter le carton dans le conteneur des déchets d'emballage	

Tableau 6. 2ème proposition d'allocation de tâches homme-robot

Avant de commencer, l'opérateur apporte un carton de 3 boîtes au poste de travail (figure 35, partie 1), il ouvre la 1^{ère} boîte et la place dans un endroit spécifique (figure 34, partie 2), puis il touche le robot pour qu'il démarre (figure 35, partie 3). Le robot vient chercher la boîte ouverte, et la vide dans le conteneur dédié (figure 35, partie 4). Simultanément, l'opérateur prépare la 2e puis la 3e boîte. Ensuite, le robot retourne les boîtes vides à l'opérateur et recommence son cycle (figure 35, partie 5). L'opérateur empile les boîtes vides dans un endroit défini (figure 35, partie 6), jette les cartons dans le conteneur des déchets d'emballage, et apporte un autre carton de 3 boîtes pour que le cycle puisse recommencer.

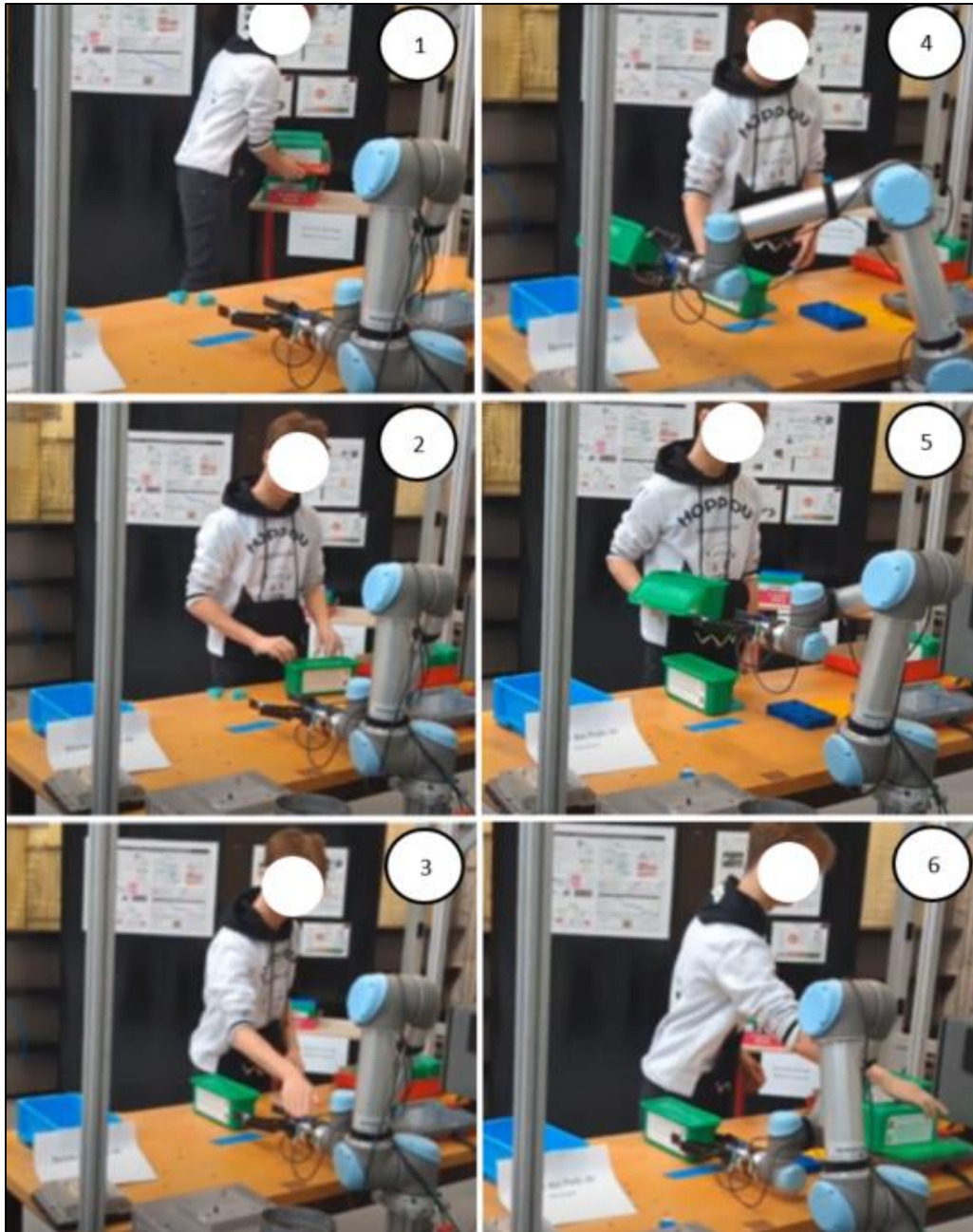


Figure 35. Images du deuxième prototype cobotique développé

2.6. Test et évaluation des solutions

Après le développement des prototypes, des sessions de test ont été organisées. Ces sessions de test consistaient en une simulation de travail avec les prototypes développés par 5 opérateurs volontaires. Dans un premier temps, une présentation du poste de travail a été organisée, puis les 3 solutions ont été présentées. Chaque volontaire a essayé toutes les solutions avant la phase de tests chronométrés et observés. Ces sessions de tests ont duré 15 min par solution et par opérateur volontaire.

Pendant ces sessions de test, le nombre de boîtes recyclées a été compté et une productivité moyenne par minute a été calculée. Pour les feedbacks sur les aspects liés aux conditions de travail, le formulaire proposé pour évaluer l'Indicateur de Choix Subjectif (tableau 4, chapitre précédent) a été rempli par tous les volontaires après chaque session de test.

3. Discussion des résultats et perspectives

Après les étapes d'analyse des opérations, d'idéation des scénarios d'assistance, d'étude de faisabilité, de simulation fonctionnelle, d'analyse des risques et de prototypage, l'équipe est parvenue à 3 solutions différentes :

- Solution 1 : l'outil manuel d'aide à l'ouverture des boîtes ;
- Solution 2 : le premier scénario d'assistance humain-robot ;
- Solution 3 : le deuxième scénario interactif humain-robot.

Afin de comparer ces trois solutions, l'équipe s'est mise d'accord sur les critères suivants :

- Les coûts engendrés ;
- L'impact sur les conditions de travail et l'acceptabilité des opérateurs volontaires ;
- L'impact sur la productivité (par rapport à la productivité 100 % manuelle : 6 boîtes recyclées par minute) ;
- La sécurité des utilisateurs conditionnera la validation de la solution retenue.

Ainsi, pour la comparaison des solutions proposées, 3 indicateurs ont été utilisés : l'ICS, la productivité (nombre de boîtes recyclées par minute) et les coûts induits. Ensuite, une étape d'analyse de risque permettrait de confirmer ou non la solution retenue.

Les tableaux 7 et 8 présentent respectivement les résultats des sessions de test de l'indicateur de productivité et des moyennes des 4 composantes (A1, A2, A3, et A4) de l'ICS. Les données collectées utilisées pour calculer l'ICS sont disponibles en annexe 1.

Productivité (boîtes/min)	Solution 1	Solution 2	Solution 3
Opérateur volontaire 1	5	4	3
Opérateur volontaire 2	4	4	3
Opérateur volontaire 3	5	4	3
Opérateur volontaire 4	4	4	3
Opérateur volontaire 5	5	4	3
Productivité moyenne	4,6	4	3

Tableau 7. Mesure de la productivité des solutions testées

Comme le montre le tableau 7, la productivité des 3 solutions développées est inférieure à la productivité du processus manuel (6 boîtes recyclées par minute). Les productivités des solutions 2 et 3 sont constantes, car elles sont limitées par la vitesse maximale de fonctionnement du robot (mesure de sécurité). Une variabilité de la productivité est perçue lors des tests de la 1ère solution. Cette variabilité est expliquée par les résultats des composantes de l'indicateur ICS (tableau 8).

ICS (%)	Solution 1	Solution 2	Solution 3
A1 (moyenne) : la facilité d'utilisation	20 %	85 %	65 %
A2 (moyenne) : l'utilité perçue	15 %	90 %	40 %
A3 (moyenne) : la sécurité perçue	95 %	80 %	45 %
A4 (Moyenne) : l'acceptabilité potentielle	10 %	85 %	40 %
ICS moyen	35 %	85 %	47,5 %

Tableau 8. Estimation de l'ICS des solutions testées

Bien que les coûts de la solution 1 soient négligeables, et que sa productivité soit supérieure à celles des solutions 2 et 3, cette solution a été rapidement éliminée par le groupe de conception. En effet, l'outil conçu n'a pas apporté une aide significative à l'opération d'ouverture de boîtes. Au contraire, son utilisation était dans la plupart des cas contraignante et peu efficace. Ces affirmations sont reflétées par l'indicateur ICS. Cette solution n'a obtenu que 35 % d'ICS, avec une acceptabilité d'utilisation potentielle (A4) de seulement 10 %.

Pour les solutions 2 et 3, les coûts impliqués sont presque identiques. La productivité de la solution 2 est relativement plus élevée que celle de la solution 3 et l'indicateur ICS de la solution 2 est considérablement plus élevé que celui de la solution 3, reflétant une grande différence dans l'utilité perçue, la sécurité perçue et l'acceptabilité potentielle. Ceci a été remarqué lors des sessions de tests. L'allocation de l'opération la plus contraignante (O4) au robot a rendu la séquence des tâches fluide et relativement rapide. En effet, les opérateurs volontaires n'ont pas attendu le robot contrairement à la solution 3, où plusieurs moments d'attente ont été observés.

Cette analyse tend à favoriser la solution 2 par rapport aux solutions 1 et 3. Elle prédit que la solution 2 serait plus adaptée et acceptée pour assister les opérateurs lors des opérations de recyclage des boîtes. Elle prévoit également que la solution 1 est plus susceptible d'être rejetée par les opérateurs.

Des tests plus formels avec les opérateurs réels pourraient conduire à des résultats et des analyses plus significatifs.

La deuxième solution n'implique aucun contact physique entre l'Homme et le robot pendant le temps de production. Comme mentionné dans la section 2.4 (simulation fonctionnelle et analyse

des risques), la sécurité des utilisateurs sera assurée par un arrêt contrôlé de sécurité (ISO/TS15066). Ce système consiste à arrêter le robot si un humain pénètre dans son espace de travail. Il est réalisé à l'aide de capteurs pour détecter la présence humaine.

Le principal inconvénient de la solution 2 est sa faible productivité par rapport à celle du processus manuel. Pour remédier à cette limite, dans des conditions industrielles, une zone de stock tampon avec un convoyeur vers la station de recyclage peut être prévue. Ceci permettra de libérer du temps pour l'opérateur qui, en plus de surveiller et de gérer la station de recyclage, pourra s'occuper d'autres tâches. Une autre amélioration possible serait de déverrouiller les vitesses du cobot lorsqu'il n'est plus dans l'espace de travail de l'opérateur comme le permet la norme (ISO/TS15066). Cette modification doit être complétée par une nouvelle analyse des risques afin de s'assurer que la sécurité des utilisateurs est toujours garantie.

Conclusion

Dans ce chapitre, les propositions méthodologiques de cette thèse ont été mises en pratique. Les étapes du cadre méthodologique de conduite du processus de conception des systèmes cobotiques ont été déroulés, de l'analyse stratégique du projet, jusqu'à l'évaluation finale des solutions développées. L'indicateur du choix subjectif a été testé, il s'est révélé déterminant lors du choix de la solution favorisée dans le cadre de ce cas d'étude.

L'organisation de ce cas d'étude dans des conditions de laboratoire de recherche a facilité le déroulement des étapes de conception, et a permis d'arriver à un niveau de maturité technologique très élevé. Cependant, l'absence du caractère 'réaliste' lors de l'étape d'analyse de l'existant représente la limite principale de ce cas d'étude.

Pour dépasser cette limite, et confirmer notre cadre méthodologique dans un contexte industriel, un deuxième cas d'étude dans des conditions industrielles réelles a été entamé. Le contexte de ce cas d'étude, son avancement et son apport à ce travail de thèse sont présentés à travers le chapitre suivant.

Chapitre 4

Cas d'étude d'assistance des postes de finition

Introduction

Ce chapitre présente le deuxième cas d'étude de cette thèse. L'objectif de ce 2^e cas d'étude est la confrontation de ce travail de recherche avec des conditions industrielles opérationnelles.

La valeur ajoutée principale du contexte de ce cas d'étude réside dans les échanges intéressants avec les équipes du partenaire industriel et leurs rôles pour nourrir les étapes d'analyse du système existant et les étapes de proposition et d'étude des possibilités d'assistance des postes concernés par ce projet.

Une deuxième dimension importante de ce cas d'étude réside dans la complexité des postes de travail à assister. En effet, d'un point de vue « composition des gestes » et « variabilités des produits », l'activité visée par ce projet est très complexe.

Dans ce chapitre, nous commencerons d'abord par la présentation du contexte de ce cas d'étude, nous décrirons par la suite la nature des postes de travail concernés par le projet d'assistance, nous détaillerons les étapes d'analyse effectuées et nous mettrons en avant les apports de chacune de ces étapes. Enfin, nous présenterons, les perspectives données à ce projet.

1. Contexte et objectif du cas d'étude

Ce cas d'étude a eu lieu dans une PME française, spécialisée dans la fabrication des noyaux céramiques, destinés au secteur aéronautique et à la production des turbines.

Ces pièces mécaniques sont très fragiles. Elles ont des tolérances géométriques très réduites pour relever des enjeux de fiabilité et de sûreté. Comme le montre la figure 36, le processus de production de ces pièces englobe les étapes suivantes :

- D'abord une pâte servant de matière première est préparée ;
- Elle est injectée avec des injecteurs pour prendre la forme des pièces ;
- Ces pièces injectées sont cuites au four pour acquérir les caractéristiques intrinsèques nécessaires ;
- Les pièces cuites sont ensuite traitées dans un atelier manuel de finition. Cette phase consiste à traiter les pièces par unité, de telle façon à atteindre la qualité attendue par les clients ;
- Enfin, les pièces finies sont assemblées et revêtues de cire pour qu'elles soient prêtes à être utilisées pour des opérations de moulage à la cire perdue chez les clients.

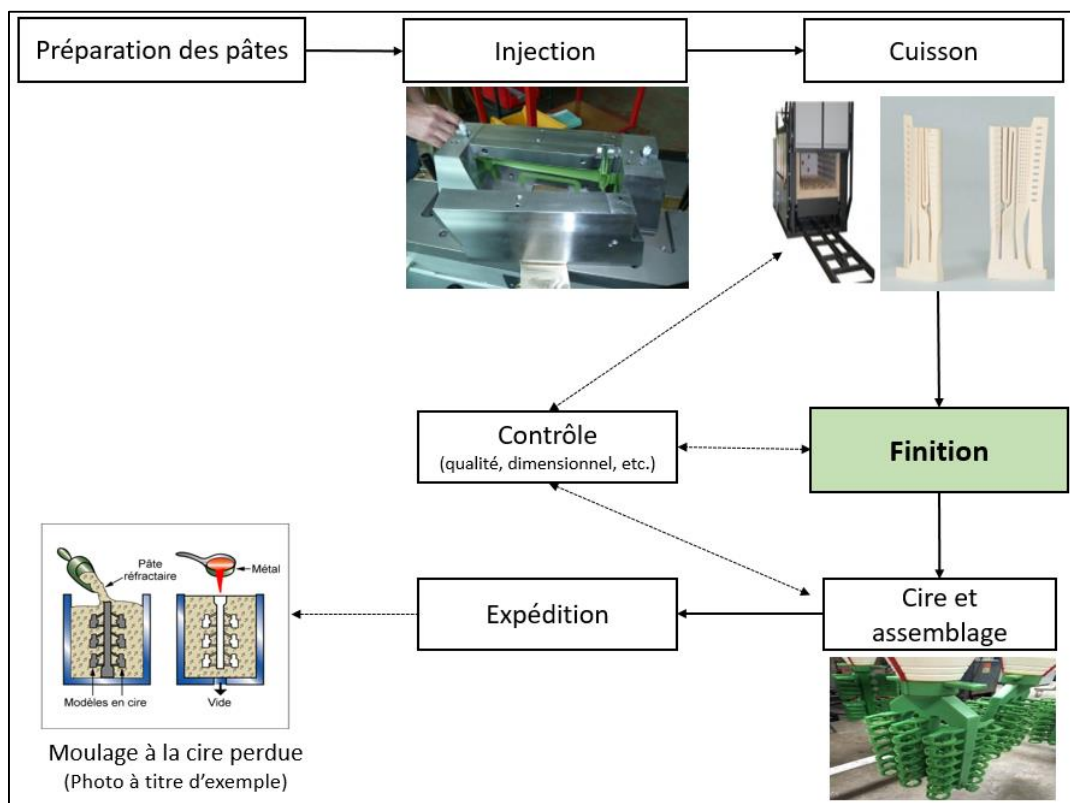


Figure 36. Schéma du processus de fabrication des pièces concernées par le projet

L'étape visée par ce projet est l'étape de finition. La direction de l'entreprise partenaire avait comme objectif d'assister cette partie du processus de fabrication, en investiguant l'apport de la robotique collaborative pour ces postes de travail manuel. Les premières discussions avec les membres de direction ont abouti à la formalisation des objectifs de ce cas d'étude de la manière suivante :

Les activités de finition sont-elles cobotisables ?

- Si oui, quelles sont les opérations susceptibles d'être portées par une solution cobotique ?

Quelles technologies cobotiques existantes ou à concevoir faudrait-il mobiliser ?

- Sinon, quelles autres formes d'assistances techniques et organisationnelles sont susceptibles d'assister le travail à ces postes ?

2. Déroulement et résultats d'analyse et de modélisation des activités de finition

La dimension de participation était centrale durant la conduite de ce cas d'études. Avant le début des phases d'analyse, un groupe de pilotage a été constitué, ce groupe avait pour objectifs : la discussion des différents éléments liés à l'organisation de ce cas d'étude, le suivi et la discussion des résultats des différentes étapes de ce projet. Durant les phases d'analyse, deux groupes de travail ont été organisés, le 1^{er} avec la cheffe d'équipe de l'atelier finition, et le 2^e avec des opérateurs de finition ayant des expériences différentes.

2.1. Analyse stratégique du projet

Avant d'entamer la phase d'analyse de l'activité de finition, des entretiens et des échanges avec l'équipe de direction et de management de proximité ont été organisés. Ces entretiens avaient comme objectifs :

- L'analyse du contexte du projet d'assistance de l'activité de finition ;
- La compréhension des enjeux liés à ce projet ;
- La compréhension de l'organisation de l'entreprise afin d'identifier les acteurs pertinents à solliciter durant la phase d'analyse de l'activité de finition (à travers des entretiens et des séances d'observation).

Cette étape a été bénéfique et a permis à l'équipe intervenante de mieux contextualiser le projet d'assistance, de comprendre le processus de production des pièces concernées par le projet, de comprendre l'organisation de l'atelier de finition et de comprendre les enjeux liés à l'activité de finition. Les résultats de ces premières analyses, peuvent être résumés selon les 4 dimensions suivantes :

- Dimensions liées au bassin d'emploi, au recrutement et à la prévention des TMS (ces dimensions ont évolué après la crise sanitaire liée au covid-19) :

Les échanges et entretiens ont relevé qu'aucune formation au métier de finition n'est disponible. Les personnes recrutées doivent donc se former aux postes de travail après le recrutement. Bien que le bassin d'emploi de la région géographique de l'entreprise est historiquement favorisant pour la disponibilité des compétences nécessaires à ce métier (bassin d'emploi de la céramique, de la bijouterie, etc.), la disponibilité d'un savoir-faire technique qui peut s'adapter et évoluer dans le domaine de l'entreprise est limitée.

Avant la crise sanitaire, les activités de l'entreprise en lien avec le recrutement, la formation et la fidélisation nécessitaient des efforts importants. L'entreprise partenaire a développé plusieurs programmes de recrutement, notamment en collaboration avec les acteurs de l'emploi (pôle emploi par exemple) pour pouvoir recruter les compétences adaptées au métier. Cette dimension a évolué durant la crise sanitaire liée au Covid-19, du fait que le secteur de l'entreprise est parmi ceux les secteurs les plus impactés par cette crise.

Une dimension importante relevée durant cette phase est la volonté de l'entreprise d'être dans une approche préventive des TMS. Bien qu'aucun cas des TMS n'a été déclaré au sein de l'entreprise.

- Savoir-faire reconnu en finition des noyaux céramiques :

Les entretiens avec l'équipe de direction ont relevé que l'étape de finition représente une partie centrale de l'activité de l'entreprise. Il s'agit de l'activité qui mobilise le plus de ressources humaines (une trentaine de personnes). C'est également l'étape du processus qui absorbe toutes des imperfections accumulées tout au long du processus de fabrication.

En plus, pour une partie des clients, l'entreprise est sollicitée par des fabricants du même type de produits, pour effectuer uniquement la partie de finition !

- Taux de rebut et les « négociations » autour du caractère « Qualité » des produits avec les clients :

Cette première phase a révélé que la dimension « qualité », qui a une place centrale vu le secteur de l'entreprise, suscite des discussions et négociations fréquentes avec les clients, qui ont des tolérances de plus en plus exigeantes.

Cette dimension doit évidemment être prise en compte durant l'étude des possibilités d'assistance de ces postes de travail. En effet, si avec un travail 100 % manuel, la qualité est toujours une quête, le futur système ne doit pas être un frein durant les opérations de finition.

- Inscription dans le contexte de l'industrie 4.0 et de l'amélioration continue :

Durant les entretiens avec l'équipe de direction de l'entreprise partenaire, la volonté de moderniser le système de production était très claire.

Que ce soit pour l'atelier de finition ou pour les étapes d'injection et de cuisson, l'entreprise est en veille continue pour garder sa capacité concurrentielle. L'entreprise a même des projets de recherche de rupture, qui peuvent transformer toute l'activité de production du noyau céramique.

Après cette première phase d'analyse et de compréhension du contexte et des enjeux liés au projet, la deuxième phase d'analyse s'est focalisée sur les postes de finition.

2.2. Analyse et modélisation des activités de finition visées par le projet de cobotisation

L'objectif de la phase d'analyse des opérations de finition était de chercher à caractériser les gestes de finition pour pouvoir viser d'assister en priorité les parties les plus contraignantes de ce travail manuel.

Durant cette phase de caractérisation des gestes, nous avons veillé à ne pas les réduire à une succession de mouvements biomécaniques, mais à les inscrire dans une perspective plus globale prenant en compte les dimensions liées aux aspects organisationnels, perceptivo-cognitifs, collectifs et subjectifs.

Cette phase d'analyse a été marquée par la mobilisation active des opérateurs de finition pour aider à comprendre la complexité de leur activité et agir en tant que partie prenante du projet. Cette phase d'analyse s'est déroulée en 3 étapes principales :

- 1^{ère} visite de l'atelier de finition et entretien avec le chef d'équipe de finition :

Durant cette étape, nous avons cherché à avoir une 1^{ère} vision opérationnelle du travail de finition, en visitant les postes de finition, créer le 1^{er} contact avec les opérateurs de finition, parler de notre travail futur avec eux, échanger sur l'organisation de l'atelier et les sources de variabilités qui peuvent impacter le travail de finition.

- Observation outillée de l'activité de finition et entretiens d'explicitation avec les opérateurs de finition :

Cette étape centrale de la phase d'analyse des opérations visées par le projet consistait à une observation outillée (prises de vidéos), et entretiens d'explicitation en postes de travail avec les opérateurs de finition pour comprendre l'utilité et la raison de chacune de leur action durant la finition. Le choix des opérateurs à observer et des noyaux à observer a été effectué de telle façon à avoir une vision globale du travail de finition. Dans ce sens, 4 opérateurs d'expériences différentes (4 mois, 4 années, 11 années, 17 années) ont été observés durant la finition de noyaux de complexités différentes.

- Réunion de synthèse et de validation :

Après la phase d'observation, les données et informations collectées ont été analysées et traitées. Ce traitement a permis de proposer une caractérisation des opérations de finition (figure 37). Cet essai de modélisation des opérations de finition a été validé par les opérateurs de finition lors d'une réunion de travail.

<u>Mobilisation de savoir et savoir faire gestuels</u>	
<ul style="list-style-type: none"> - Inspection initiale de la pièce à travailler - Contrôle continu de l'avancement des opérations de finition sur les différentes zones de la pièce - Choix de l'outil adéquat selon l'étape et la zone de finition (papiers de verres, limes, soufflerie, binoculaire) - Coordonner les opérations des deux mains - Tenir les exigences de qualité liés à chaque référence de produit - Tenir le temps de finition indiqué - Protéger le noyau 	
<u>Main Gauche</u>	<u>Main Droite</u>
<ul style="list-style-type: none"> - Porter le produit - Préparer les opérations de la main droite - Présenter le produit - Anticiper les opérations de la main droite - Protéger le produit contre la casse 	<ul style="list-style-type: none"> - Retirer les bavures - Polir la surface travaillée - Souffler pour dégager la matière (soufflerie/bouche) - Tourner le produit - Prudence de ne pas casser ou abîmer la partie travaillée

Figure 37. Caractérisation des opérations de finition des noyaux céramiques

La caractérisation proposée met en avant 3 mobilisations intégrées et complémentaires durant le travail de finition :

- **La mobilisation des savoirs et savoirs-faire (expérience acquise et mobilisation perceptivo-cognitive) :**

Les opérations de finition mobilisent des savoirs et savoirs-faire développés à travers l'expérience acquise dans ces postes. Cette mobilisation englobe l'inspection initiale du noyau à travailler pour détecter les zones à viser en premier, les zones fragiles des noyaux, etc. ; le contrôle continu de l'avancement de la finition du noyau après chaque opération sur les différentes zones du noyau ; le choix de l'outil adéquat selon l'étape et la zone de finition (papiers de verre, limes, soufflerie, binoculaire¹¹), la coordination des opérations des deux mains ; la connaissance des exigences de qualité liées à chaque noyau ; et la protection du noyau contre la casse.

- **Les actions de la main droite (la main qui effectue les opérations de finition) :**

La main droite est mobilisée tout au long du travail de finition. C'est la main qui effectue une grande variété d'opérations englobant l'enlèvement des bavures, le polissage de la surface travaillée, le changement d'outils de travail, le changement des surfaces travaillées, et le dosage des efforts appliqués pour ne pas casser ou abîmer la partie travaillée.

¹¹ Instrument optique à double tube, destiné à l'observation à faible grossissement avec un éclairage par-dessus.

- **Les actions de la main gauche (la main qui porte le noyau, un seul cas exceptionnel d'un opérateur gaucher a été relevé) :**

La main gauche est également mobilisée durant les opérations de finition. C'est la main qui porte le noyau, et qui prépare les opérations de la main droite en présentant les surfaces adéquate. Cette main protège également le noyau en anticipant les opérations de la main droite.

2.3. Analyse systématique des opérations de finition : les enjeux de qualité et de santé

En se basant sur la caractérisation qualitative du travail de finition (figure 37), une analyse systématique a été initiée. L'objectif de cette phase d'analyse était de mieux comprendre les opérations effectuées durant le travail de finition avec la prise en compte des dimensions chronologique et quantitative.

Durant cette phase, nous avons cherché à distinguer les opérations effectuées durant le traitement d'un noyau céramique avec une base de temps : seconde par seconde. Pour cette finalité, 4 échantillons d'enregistrements vidéo des opérations de finition ont été analysés ; ils concernent des noyaux de complexités différentes, traités par des opérateurs de finition ayant des expériences différentes (de 4 mois à 17 années). Ce traitement a été effectué à l'aide du logiciel Actograph¹².

Durant cette analyse systématique, 4 observables ont été suivis :

- Les opérations effectuées par la main droite : pour poursuivre les opérations très variées effectuées par la main droite ;
- Les opérations effectuées par la main gauche : pour poursuivre les opérations effectuées par cette main ;
- L'interaction de l'opérateur de finition avec les outils du poste de travail : pour analyser l'interaction des opérateurs de finition avec les outils du poste de travail ;
- Les patterns de la main qui porte le noyau (un pattern est une configuration biomécanique de la main, mobilisé pour réaliser des actions, par exemple : la prise en pince) : pour s'assurer d'une hypothèse développée durant la phase d'observation, qui a attiré l'attention de l'équipe intervenante sur la grande occurrence du pattern « Prise en pince » de la main gauche.

La figure 38 montre les états définis de chaque observable. Cette analyse et l'utilisation du logiciel choisi se basent sur l'hypothèse que pour chaque observable, un seul état est possible pendant un instant donné du temps.

¹² ActoGraph est un logiciel pour enregistrer, visualiser et analyser l'activité au travers de chroniques, de graphes d'activités et de données statistiques.

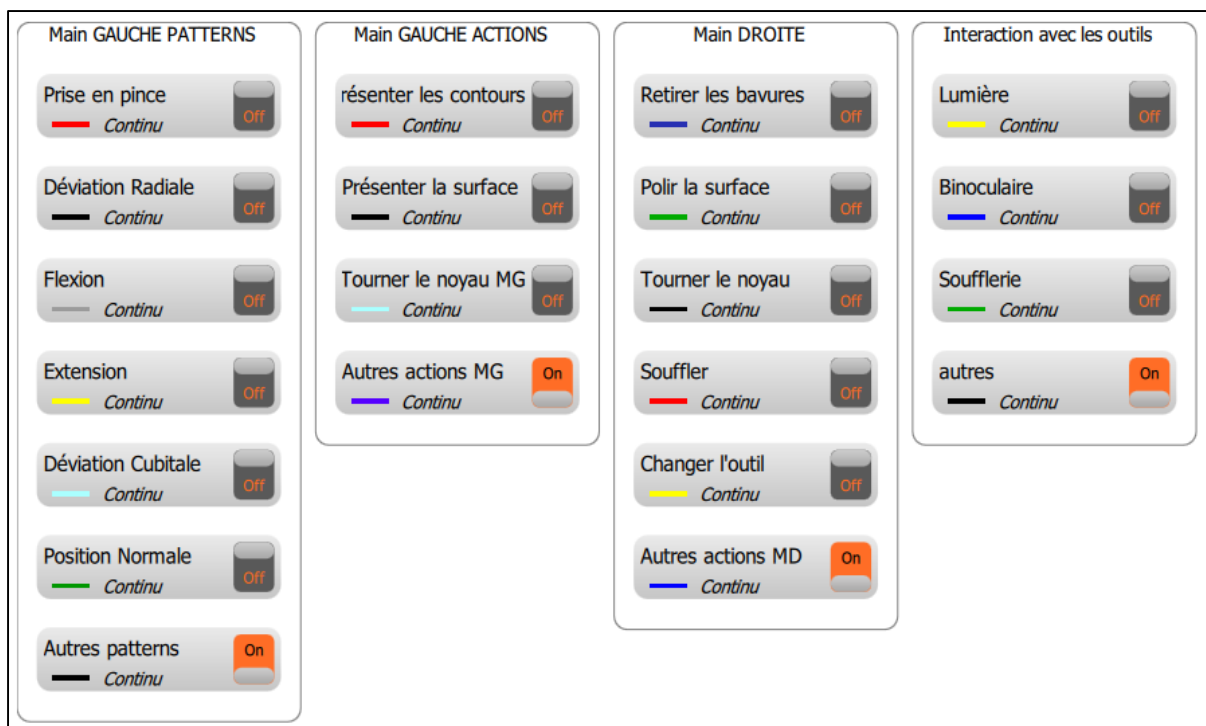


Figure 38. Les observables suivis durant l'analyse systématique des gestes de finition

Après la configuration des observables et des états choisis dans le logiciel Actograph, des séquences d'enregistrements vidéos relatifs aux 4 opérateurs de finition observés ont été préparés. Ils ont une durée moyenne d'environ 6 minutes, et ils ont été choisis de telle manière de permettre l'observation de l'ensemble des opérations effectuées durant la finition du noyau céramique. Le tableau suivant résume les caractéristiques des échantillons analysés :

Enregistrements	Opérateurs	Expérience	Catégorie du noyau
Enregistrement 1	Opérateur A	17 ans	Très complexe
Enregistrement 2	Opérateur B (le seul opérateur gaucher)	6 ans	Complexe
Enregistrement 3	Opérateur C	7 ans	Complexe
Enregistrement 4	Opérateur D	4 mois	Simple

Tableau 9. Caractéristiques des échantillons analysés

Les catégories des noyaux (de simple à très complexe) ont été définies en coordination avec les opérateurs de finition et leur chef. Plus un noyau comporte des surfaces fragiles, des bavures à enlever et des trous à percer, plus il est complexe.

Cette section est organisée en deux parties, la 1^{ère} montre les savoir-faire mobilisées pour garantir la qualité nécessaire des noyaux céramiques. La 2^{ème} partie discute l'impact des gestes de finition sur la santé des opérateurs.

A. Les savoirs-faire mobilisés pour une finition de qualité

La chronique résultante de l'analyse du 1^{er} enregistrement vidéo est présentée en figure 39.

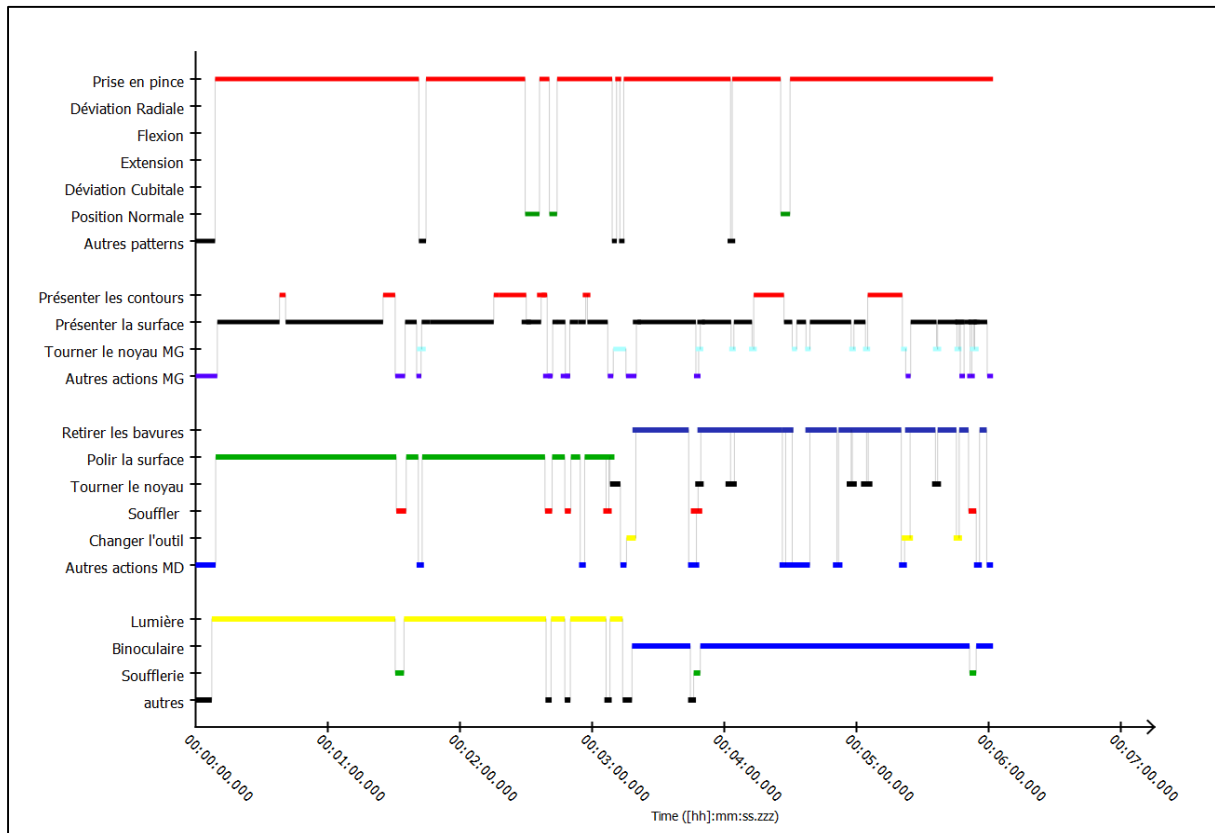


Figure 39. 1^{ère} Chronique (opérateur A) d'analyse des opérations de finition

La chronique présentée en figure 38 met en avant des dimensions importantes concernant l'organisation des opérations de finition par l'opérateur A. Dans ce sens, si on regarde la partie relative aux opérations effectuées par la main droite (2^{ème} sous-chronique de la figure), on constate que « l'opérateur A » a commencé d'abord par le polissage des différentes parties du noyau (avec le papier de verre), avant d'entamer la phase d'enlèvement des bavures. Cette phase d'enlèvement de bavures a nécessité plusieurs rotations du noyau et plusieurs changements d'outils (limes, soufflerie, etc.).

La chronique met en avant également l'interaction importante de l'opérateur avec les outils du poste de travail. Pendant la première moitié des opérations de finition observées, l'opérateur était en interaction avec la source de lumière. Pendant la deuxième partie, et pour enlever les bavures, l'opérateur a travaillé sous binoculaire qui permet un agrandissement *6 pour mieux voir les différentes bavures.

La main gauche a été également mobilisée pendant les opérations de finition. Elle a un rôle central d'accompagnement des opérations effectuées par la main droite, en préparant les parties à travailler et en orientant le noyau vers la source de lumière. La figure 40 présente la répartition des actions de la main gauche de l'opérateur 1.

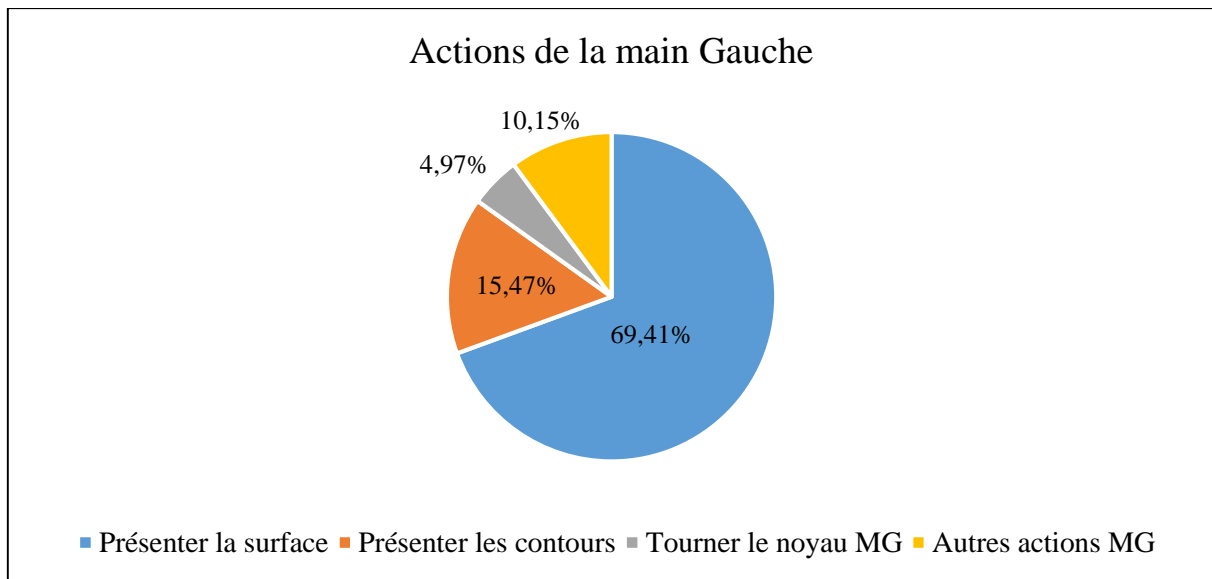


Figure 40. Actions de la main gauche, opérateur A

L'opérateur a mobilisé sa main gauche pour présenter les surfaces du noyau à être travaillée par la main droite (69.5 % du temps observé), pour présenter les contours du noyau (15.5 % du temps observés) et pour tourner le noyau et anticiper les opérations de la main droite (figure 40).

La main droite est la main qui effectue les opérations d'enlèvement de matière, à travers le polissage des surfaces en utilisant le papier de verre (45 % du temps observé), et enlevant les bavures en utilisant différentes limes (plates, rondes, de différentes tailles) (36 % du temps observé), qui utilise la soufflerie pour dégager la matière grattée et qui tourne le noyau (figure 41).

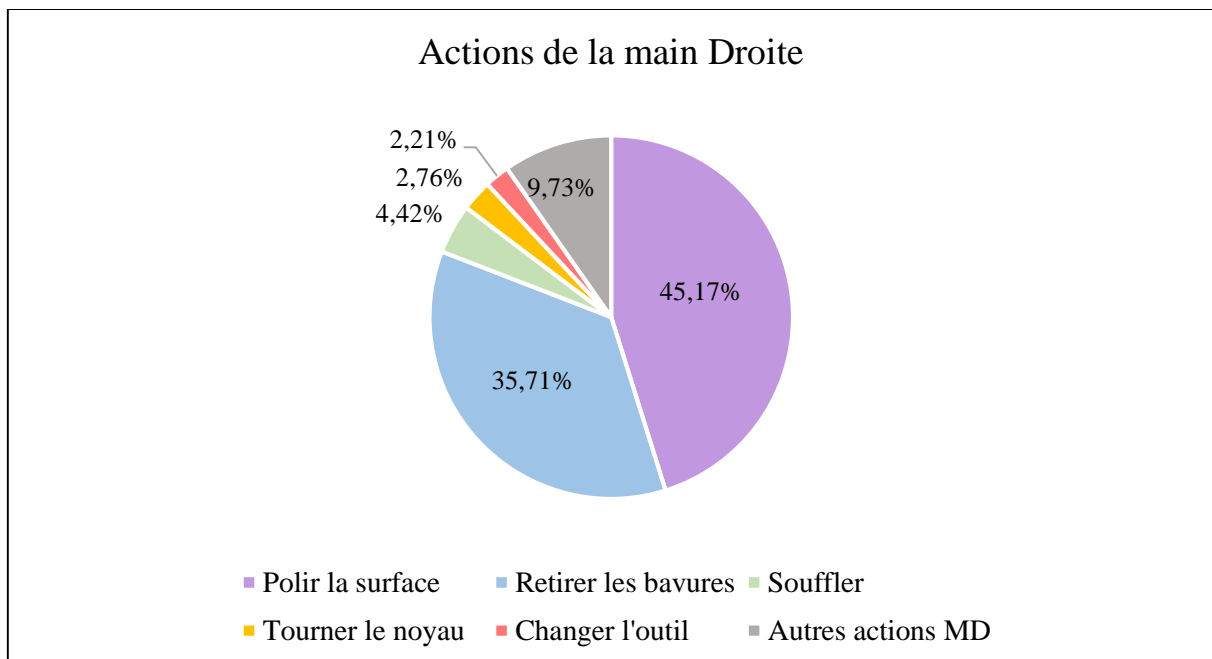


Figure 41. Actions de la main droite, opérateur A

Même si dans cette partie d'analyse nous discutons les opérations effectuées par les deux mains de manière séparée, la coordination des deux mains est une qualité essentielle pour le travail de finition. Sans une coordination des deux mains, une partie importante des noyaux –qui sont très fragiles- auraient été cassés à cause d'un effort important de la main droite, ou à cause d'une mauvaise synchronisation entre l'orientation du noyau par la main gauche et le sens des actions de la main droite.

L'interaction de l'opérateur avec les outils du poste de travail doit être prise en compte durant tout projet de transformation de ces postes de travail. En effet, l'analyse quantitative a permis de relever que pendant 49 % du temps analysé, « l'opérateur 1 » était en interaction avec la source de lumière (figure 42). Ce rapport particulier avec la source de lumière est très important durant le travail de finition. En fonction de la zone à travailler, l'opérateur orientait le noyau vers la source de lumière pour avoir la visibilité adéquate. Puis, durant la phase d'ébavurage, l'opérateur a travaillé pendant 43 % du temps observé sous binoculaire.

Pouvoir changer l'outil, utiliser la source de lumière, orienter le noyau et le tourner sont des possibilités nécessaires pour ce travail de finition. Toute solution ou scénario d'assistance doit prendre en compte ces nécessités, et veiller à ne pas les contraindre.

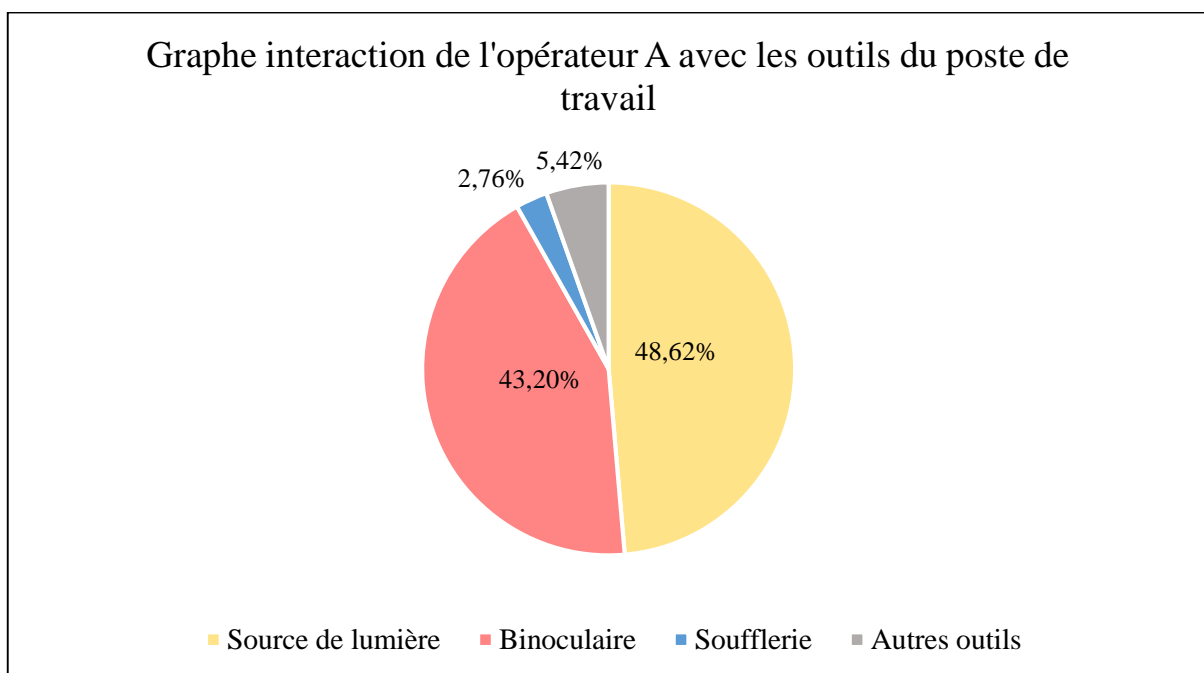


Figure 42. Interaction de l'opérateur A avec les outils du poste de travail

La 1^{ère} chronique, présentée en figure 39, concerne la finition d'un noyau très complexe, qui a des enjeux de qualité plus élevés. La figure 43, présente la 2^e chronique, relative à la finition d'un noyau moins complexe que le 1^{er}, effectuée par le seul opérateur gaucher de l'équipe de finition. Cette chronique représente les résultats d'observation systématique des opérations de finition par l'opérateur B.

Comme l'opérateur A, l'opérateur B a commencé la finition de la surface à travers des opérations de polissage, avant de commencer à enlever les bavures des contours.

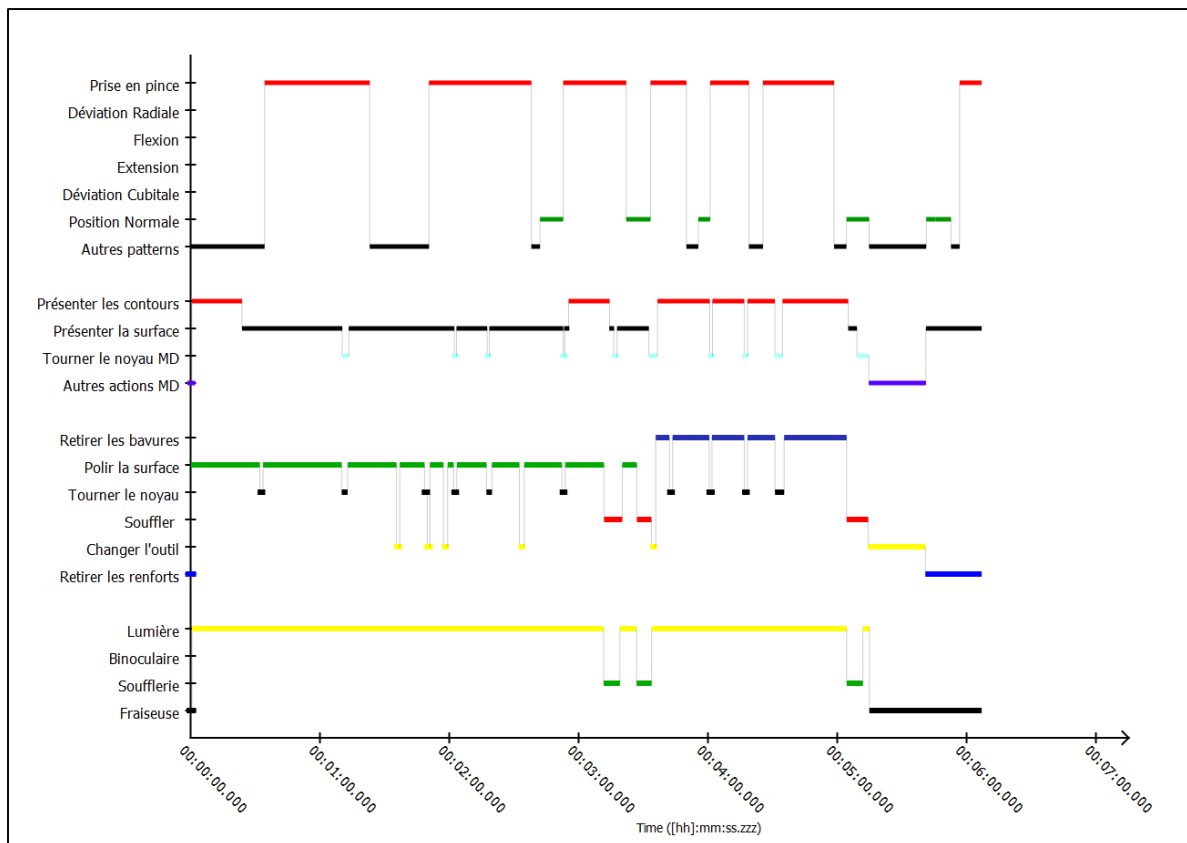


Figure 43. 2^{ème} Chronique (opérateur B) d'analyse des opérations de finition

La chronique met en avant l'importance de la lumière durant l'activité de finition. En effet, l'opérateur B a travaillé en interaction continue avec la source de lumière pendant la quasi-totalité du temps. Il a également utilisé la fraiseuse pour couper des renforts supplémentaires ajoutés pour éviter la casse des noyaux pendant la phase de cuisson

La main droite a accompagné et préparé l'ensemble des opérations effectuées par la main gauche (opérateur gaucher), en présentant les surfaces et les contours, en tournant le noyau et en l'orientant vers la source de lumière. Les graphes suivants présentent ces dimensions de manière quantitative.

L'opérateur B a mobilisé sa main droite pour présenter les surfaces du noyau à être travaillée par la main gauche (52.5 % du temps observé), pour présenter les contours du noyau (34 % du temps observé) et pour tourner le noyau et anticiper les opérations de la main gauche (figure 44).

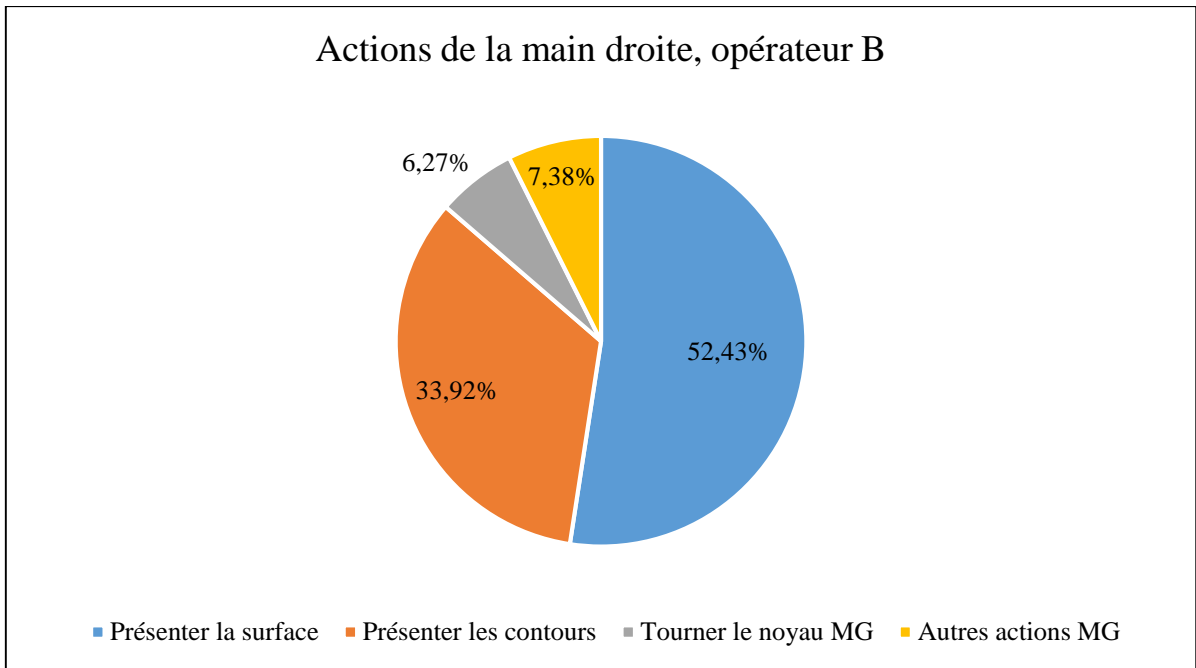


Figure 44. Actions de la main droite, opérateur B

La main gauche a effectué les opérations d'enlèvement de matière (figure 45), à travers le polissage des surfaces en utilisant le papier de verre (49 % du temps observé), et enlevant les bavures en utilisant différentes limes (plates, rondes, de différentes tailles) et la fraiseuse (22 % du temps observé). La main gauche a été mobilisée également pour dégager la matière grattée, tourner le noyau et changer l'outil.

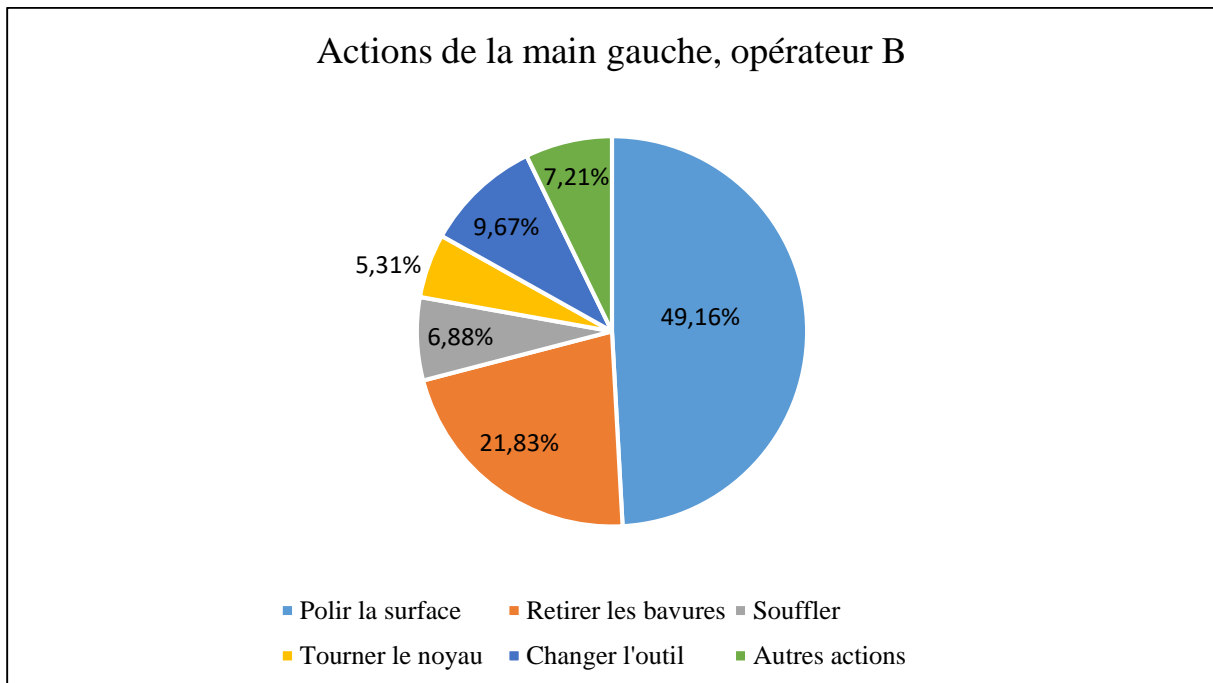


Figure 45. Actions de la main gauche, opérateur B

L'interaction importante avec les outils du poste de travail a été observée tout au long des opérations de finition. L'opérateur B a travaillé en interaction avec la source de lumière pendant 80 % du temps observé. Il a également utilisé la soufflerie pour dégager la matière grattée et utiliser la fraiseuse pour enlever les renforts ajoutés.

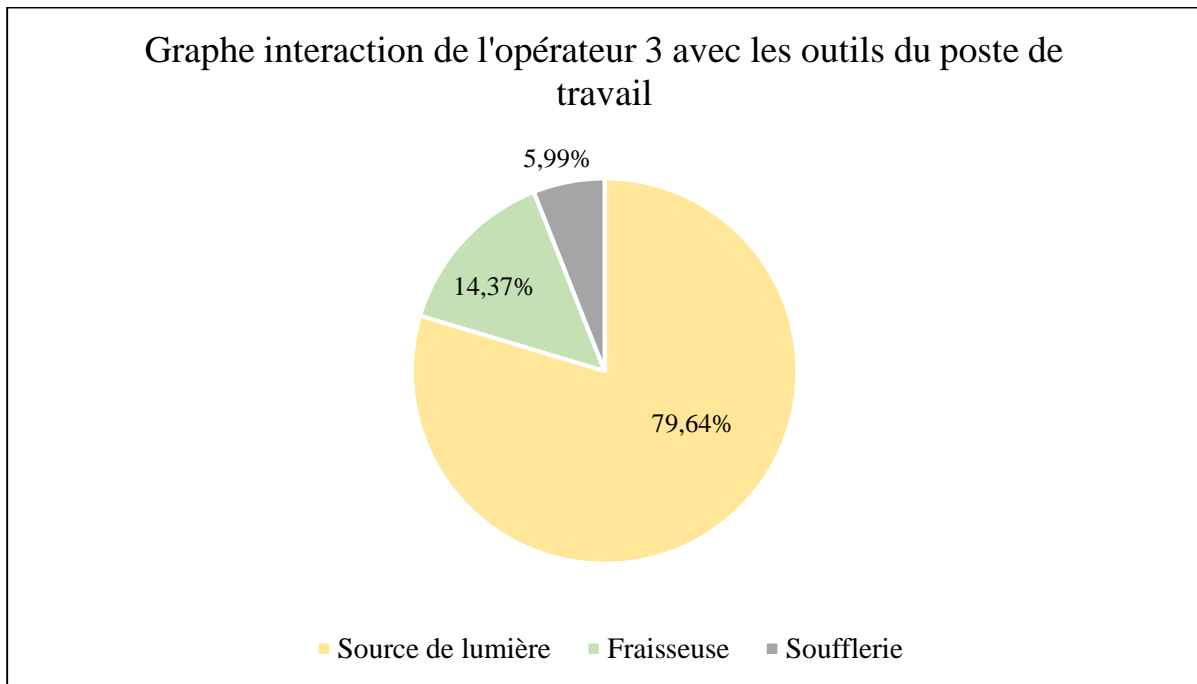


Figure 46. Graphe interaction avec les outils du poste de travail, opérateur B

Contrairement aux deux chroniques précédentes qui concernent des noyaux « complexes » et « très complexe », nous analyserons à travers la chronique 4, les mobilisations mises en place durant la finition d'un noyau « simple » (figure 47). (La chronique 3, représentant les opérations de finition d'un noyau complexe, et ses figures sont présentées en annexes 2, 3, 4, 5 et 6).

Les différences principales entre les noyaux « complexes » et les noyaux dits « simples » résident dans la fragilité des noyaux complexes à cause de leur faible épaisseur, la taille des noyaux, et de la nature des opérations de finition nécessaires. En effet, les noyaux simples n'ont pas de trous à percer, ils ont une faible quantité de contours, et une grande quantité de surfaces à polir.

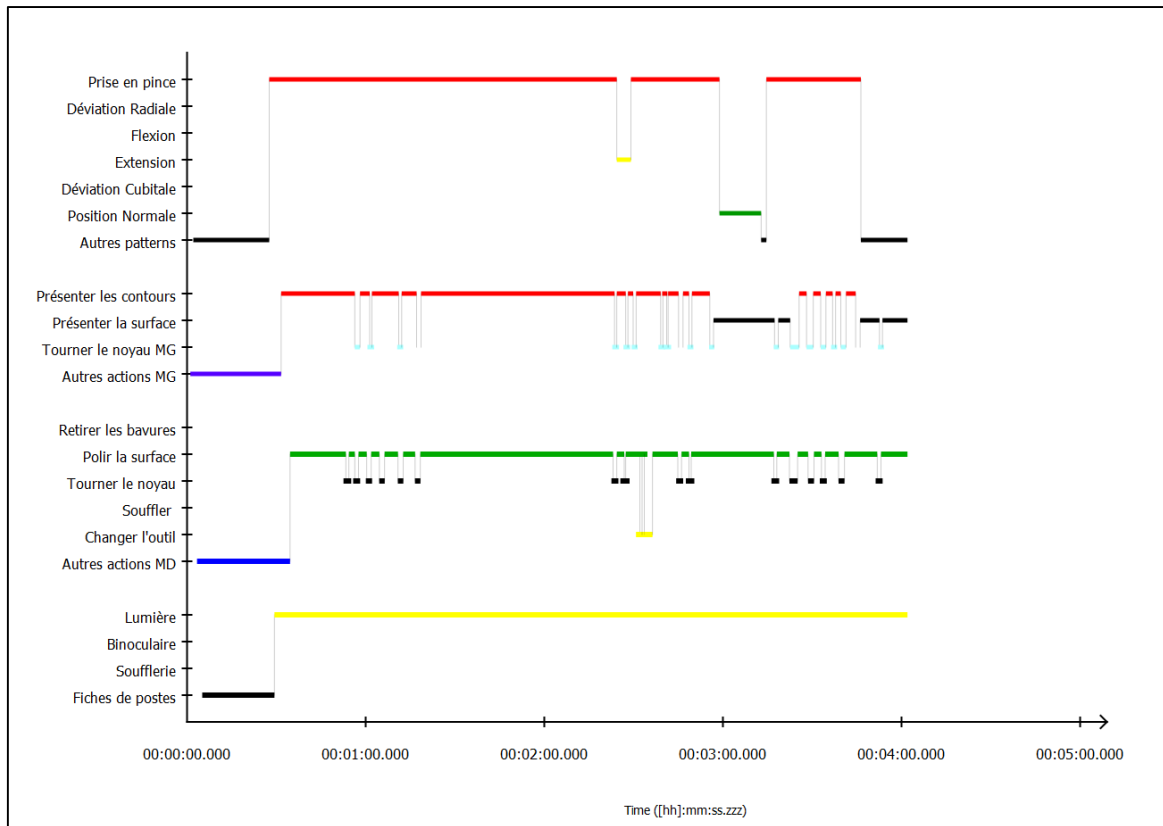


Figure 47. 4ème Chronique (opérateur D) d'analyse des opérations de finition

Par rapport aux deux précédentes chroniques, la chronique 4, présentée en figure 47 présente les principales différences suivantes durant la finition d'un noyau simple :

- La finition du noyau consistait à retravailler principalement les surfaces et les contours à travers l'opération du polissage, en utilisant différents types de papiers de verre ;
- La finition du noyau simple a demandé une interaction limitée avec les outils du poste de travail. Elle a engendré seulement des interactions avec la source de lumière.

B. La dimension de santé et la prévention des TMS liées à l'activité de finition

Les chroniques présentées et discutées à travers la section précédente (figure 39, 43 et 47) montrent l'existence d'un travail en pincement (main gauche travaillant avec la posture prise en pince) très prolongé. En effet, durant la quasi-totalité du temps observé, la main qui porte le noyau et le présente était en prise en pince.

Pour l'opérateur A, l'analyse de l'échantillon de l'observation des opérations de finition montre une mobilisation de la main gauche en prise en pince pendant environ 91.5 % du temps analysé (figure 48).

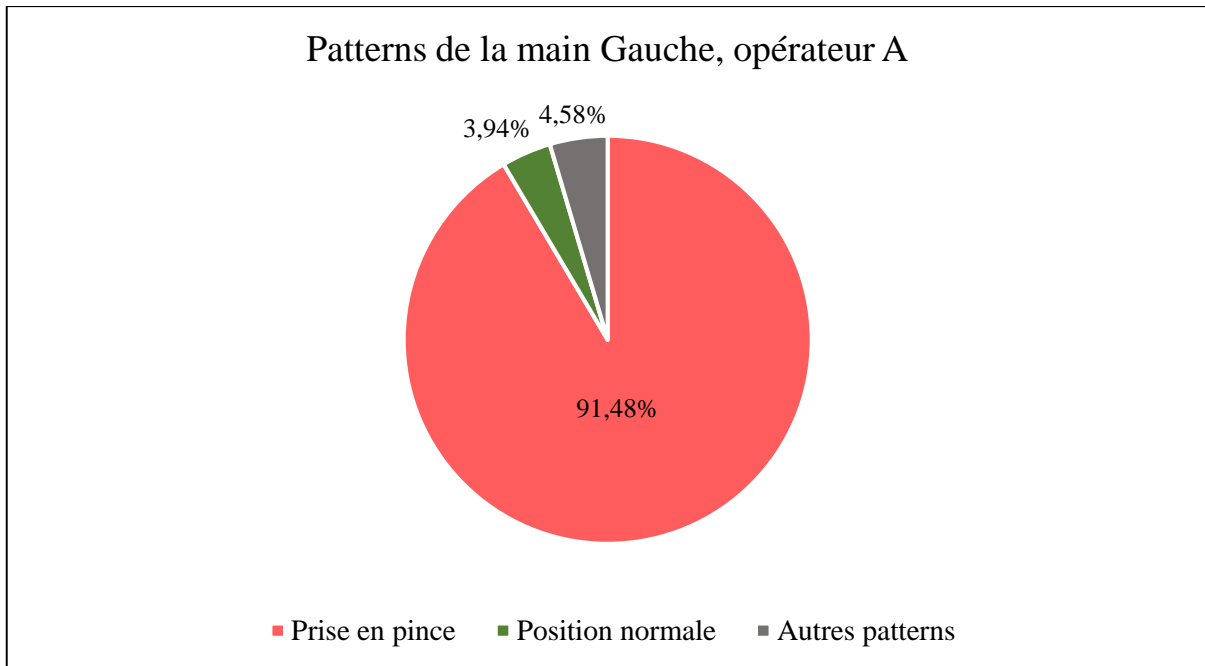


Figure 48. Patterns de la main gauche, opérateur A

Pour l'opérateur B, l'opérateur gaucher, la main droite qui porte et présente le noyau a été mobilisée en prise en pince pendant environ 55% du temps observé. Pour cet opérateur, des patterns composés (prise en pince et flexion, prise en pince et extension) ont été observés. Ils sont regroupés dans la case « autre patterns » dans la figure 49.

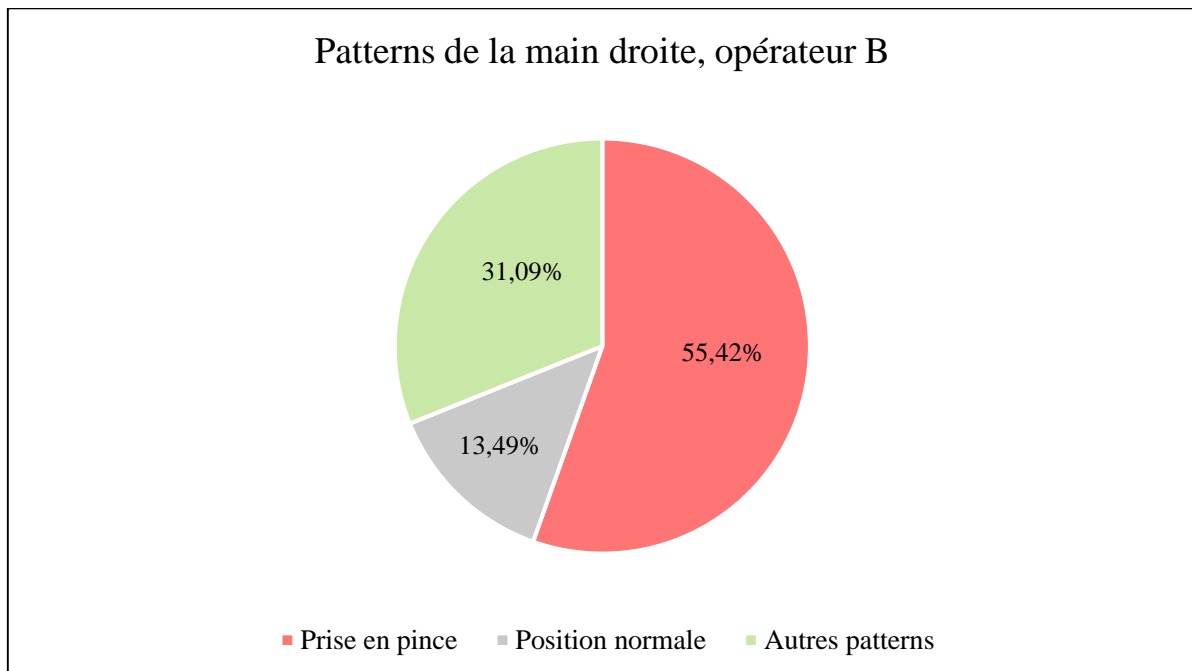


Figure 49. Patterns de la main droite, opérateur B

Pour l'opérateur D, la mobilisation de la main gauche en pincement dépasse 73% du temps observé (figure 50).

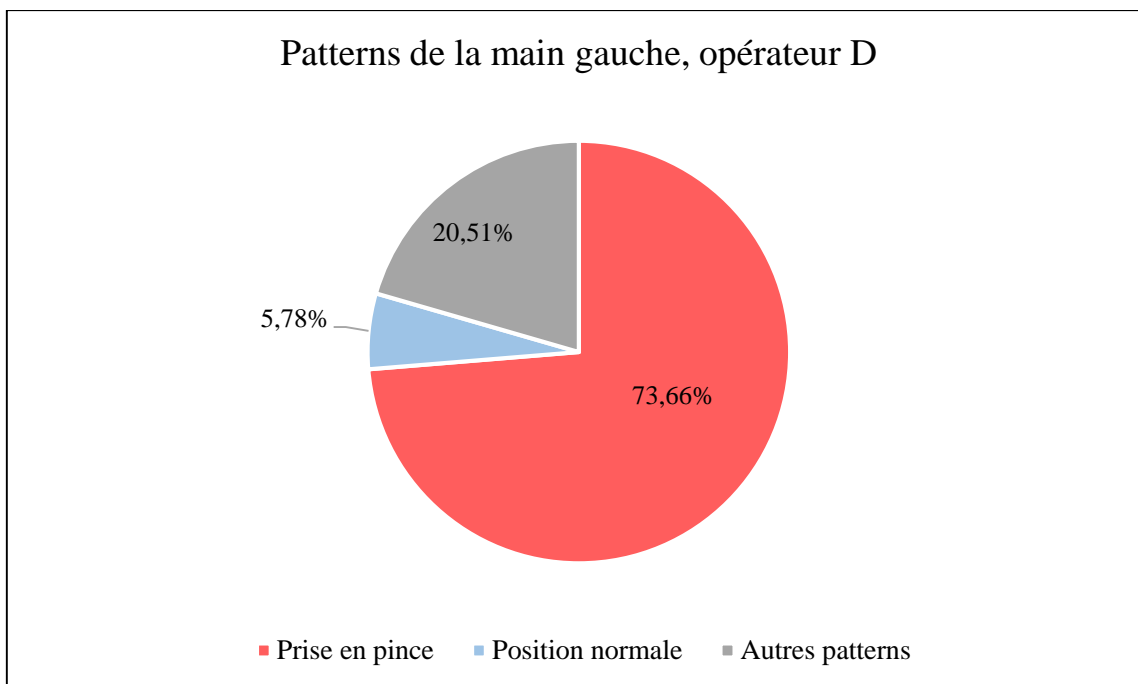


Figure 50. Patterns de la main GAUCHE, Opérateur D

Le tableau 10, résume les niveaux d'occurrence des différents patterns de la main qui porte et présente le noyau des 4 opérateurs observés.

% des patterns	Opérateur A	Opérateur B	Opérateur C	Opérateur D
Prise en pince	91,5 %	55.5 %	87.5 %	73,5 %
Position normale	4 %	13.5 %	5.5 %	6 %
Autres patterns	4,5 %	31 %	7 %	20.5 %

Tableau 10. Tableau récapitulatif des patterns relevés des 4 opérateurs observés

Malgré la seule exception de l'opérateur B (opérateur gaucher) mobilisant des patterns composés (pince + extension, pince + flexion, etc.) qui ont été exprimés dans la case « autres patterns », la comparaison de l'occurrence des différents patterns de la main qui porte et présente le noyau révèle la grande fréquence et occurrence du pattern « prise en pince ».

Ce type de préhension est réputé d'être sollicitant. Il est cité par l'INRS¹³, comme un des facteurs de risque des TMS, et plus particulièrement du syndrome du canal carpien.

2.4. Construction collective et évaluation du scénario de cobotisation

Après la phase d'analyse des opérations de finition, une piste d'assistance a émergé. Cette piste d'assistance vise à répondre à l'alerte de la mobilisation sollicitant la main gauche

¹³ Source : <https://www.inrs.fr/risques/tms-troubles-musculosquelettiques/facteurs-risque.html>

en prise en pince. L'idée est de chercher ou de concevoir un système d'assistance de la main qui porte le noyau, pour diminuer en particulier la sollicitation en pincement.

Cette piste d'assistance a été discutée avec les opérateurs de finition. Ils ont confirmé d'abord que des douleurs sont fréquemment ressenties en cette main qui porte le noyau. Plus particulièrement, après les journées de finition des noyaux ayant des tailles très petites ou grandes. Ils ont exprimé également leur intérêt de voir et découvrir les caractéristiques de ce système d'assistance potentiel.

Dès le début de l'émergence de cette perspective d'assistance de la main gauche, l'équipe de conception était convaincue que ce système potentiel ne fonctionnera pas pour tous les noyaux céramiques (en fonction du poids, de la fragilité, de la complexité de la finition). En effet, pour les noyaux céramiques très complexes, qui nécessitent l'utilisation de plusieurs outils, l'accès à des petites surfaces, l'utilisation du binoculaire pour une grande partie de la finition, l'utilisation de ce système serait contraignante. Par contre, il serait utile pour les noyaux simples nécessitant principalement des opérations de polissage, un changement d'outil limité, et une interaction limitée avec les outils du poste de travail.

L'équipe imagine l'utilisation de ce système potentiel en mode « assistance » de la main gauche et non pas comme un mode de remplacement de la main gauche. Comme précisé à travers la phase d'analyse des opérations de finition, la flexibilité, l'agilité et la coordination sont des composantes essentielles des habiletés mobilisées durant le travail de finition des noyaux céramiques. Le tableau suivant résume les opérations actuelles et les opérations potentielles de la main qui porte le noyau selon la piste d'assistance présentée.

Mobilisations actuelles de la main gauche	Mobilisations potentielles de la main gauche
Porter le noyau	-
Présenter le noyau à la main droite	Présenter le système d'assistance à la main droite
Préparer les opérations de la main droite	Orienter le système d'assistance en fonction des surfaces à travailler
Orienter le noyau céramique vers la source de lumière	Orienter le système d'assistance vers la source de lumière

Tableau 11. Récapitulatif des mobilisations actuelles et futures-potentielles de la main gauche

2.5. Étude de faisabilité technologique

Après la phase de construction du scénario d'assistance, les résultats de l'étude et de l'analyse des opérations de finition ont permis de formaliser les fonctions (fonction principale et fonctions contraintes) que le système d'assistance futur doit assurer pour ne pas contraindre et empêcher le travail de finition (voir tableau 12).

N°	Fonctions (Principales ou Contraintes)	Flexibilité
FP1	Assurer le port du noyau céramique	Nulle
FC1	Permettre de porter une variété de noyaux céramiques	Moyenne
FC2	Permettre de tourner et incliner le noyau céramique avec souplesse et flexibilité	Faible
FC3	Permettre de ressentir les forces appliquées sur le noyau (retour de force)	Faible
FC4	Ne pas abîmer ou casser le noyau céramique porté	Nulle
FC5	Permettre de monter et démonter le noyau céramique rapidement et facilement	Faible
FC6	Permettre la maintenance du système d'assistance	Moyenne
FC7	Assurer la sécurité des utilisateurs (conformité à la directive machine)	Nulle

Tableau 12. Tableau récapitulatif des fonctions attendues du système d'assistance

Ces fonctions englobent la fonction principale du système d'assistance, qui consiste à porter le noyau céramique. Elles englobent également la possibilité de s'adapter et porter une variété de noyaux, ayant des tailles et formes différentes ; permettre la manipulation du noyau céramique avec souplesse, sans supprimer le retour des forces appliquées par la main droite. Une vigilance particulière doit être portée également à la fragilité et la sensibilité des noyaux, le système futur ne doit pas les abîmer. Enfin, les dimensions liées à la maintenance du système et à la sécurité doivent être considérées dès la phase de conception. Par exemple, puisque les postes de finition sont en contact direct avec la poussière (la matière enlevée), les joints du système d'assistance doivent être protégés pour éviter que la poussière impacte le fonctionnement du système.

Après cette étape de formalisation des fonctions attendues du futur système, la veille technologique a permis de recenser les pistes technologiques qui peuvent répondre à la fonction principale du système d'assistance en conception. Ces pistes technologiques sont présentées en tableau 13.




Principe de solution	Technologie	Options et Précautions	Images
À base de système mécatronique	Conception sur mesure	Transparence du fonctionnement et de la commande ?	
À base de système cobotique	Choix d'un bras manipulateur	Taille et compacité ? Compliance ? Portée ? Charge utile ? Prix ?	
	Choix ou conception d'un effecteur	Pince (2, 3, 4 doigts) ; aspiration ; adhésion (forces intermoléculaires) ; autres ?	
À base d'exosquelette	Un gant d'assistance	Le ressenti des efforts et de la matière ? Déplacement des contraintes ?	
	Exosquelette pour la main		

Tableau 13. Récapitulatif de la veille technologique réalisée

Ces pistes technologiques peuvent être classées en 3 parties :

- Solutions d'assistance à base de systèmes mécatroniques : l'entreprise doit dans ce cas rédiger un cahier des charges avec des spécifications fonctionnelles et échanger avec les entreprises spécialisées dans la conception mécanique, afin de concevoir un système « sur-mesure » qui peut répondre aux fonctions attendues. Deux points de vigilance doivent être considérés, relatifs respectivement à la souplesse du mouvement du système d'assistance (pour les phases d'orientation des noyaux) et à la fluidité de la commande (l'interface humain-système d'assistance) ;
- Solutions à base de systèmes cobotiques : dans ce cas, un effecteur doit être choisi ou conçu (en ajoutant des composants externes), et un robot adapté doit être sélectionné. A ce type de solutions, un certain nombre de points de challenges techniques sont à relever ; ils englobent la prise des noyaux, l'interface utilisateur-robot, la compacité du système d'assistance, son prix et la fluidité de la commande ;

- Solution à base d'exosquelettes : ce type de solutions englobe les exosquelettes pour les doigts et pour la main, et les gants d'assistance. Les points de vigilances liés aux exosquelettes sont nombreux. Ils englobent, dans notre cas, la suppression du ressenti des efforts appliqués, l'absence de la possibilité du toucher de la matière, ou encore le déplacement des contraintes.

Une première étape de sélection a été effectuée en croisant les caractéristiques de ces solutions avec les fonctions attendues du système d'assistance. Les résultats de cette 1^{ère} sélection sont résumés à travers le tableau 14.

N° de fonction	Principe de solution	FP	FC1	FC2	FC3	FC4	FC5	FC6	FC7
Flexibilité		Nulle	Faible	Faible	Faible	Nulle	Faible	Faible	Nulle
Adéquation entre les principes de solutions cobotiques & les fonctions contraintes	Pince	Oui	?	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
	Aspiration	?	Non	Oui	Oui	?	Oui	Oui	Oui
	Adhésion	Oui	?	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Adéquation entre les principes de solutions à base d'exosquelettes & les fonctions contraintes	Gant d'assistance	Oui	Oui	Oui	Non	?	Oui	Oui	Oui
	Exosquelette pour main	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui

Tableau 14. Tableau comparatif : Fonctions attendues VS Pistes technologiques

Dans le tableau 14, une case verte signifie que la fonction serait potentiellement satisfaite, une case rouge signifie que la fonction ne sera potentiellement pas satisfaite, et une case jaune signifie que des tests sont nécessaires pour vérifier l'adéquation du principe de solution avec la fonction.

Par exemple, il nous semble que le principe de solution cobotique à base d'aspiration ne permettrait pas de porter une variété de noyaux céramique, car la majorité des noyaux ont des surfaces non-planes et des trous, ce qui rendra la tâche du port difficile. Pour ce même principe de solution, un doute important est à vérifier quant à l'impact de la solution sur la qualité du noyau (FC4), car une prise par aspiration peut laisser des traces visibles sur les noyaux. Pour cette fonction contrainte, nous estimons qu'une prise des pièces à l'aide des pinces (2 doigts ou 3 doigts) abîmerait les noyaux céramiques.

Pour les solutions à base d'exosquelettes (gant d'assistance et exosquelette), nous pensons que les retours de force seront très limités voire même supprimés (FC3). Nous estimons également que la fonction FC4 relative à la qualité de la surface des noyaux ne sera pas garantie avec l'utilisation d'exosquelettes pour les doigts.

Cette confrontation entre pistes technologiques et fonctions attendues tend à favoriser le principe de solution à base de système cobotique utilisant un effecteur fonctionnant par adhésion (voir exemple d'effecteur en figure 51). Ce type d'effecteur permettrait de relever le challenge technique de porter ces noyaux céramiques, sans les abîmer.



Figure 51. Exemple d'effecteur à base d'adhésion de la société SCHUNK¹⁴

Cette première sélection n'implique pas que cette solution fonctionnera ; mais des étapes du développement et de test sont nécessaires pour s'assurer de l'adéquation de la solution avec l'ensemble des caractéristiques et contraintes liées au travail de finition.

Pour avancer dans les étapes de développement, une formalisation fonctionnelle des fonctions attendues du futur système est nécessaire. En effet, les fonctions exprimées en tableau 12, doivent être exprimées de façon quantitative et exhaustive avant de commencer la phase de prise de contact avec les fournisseurs potentiels. Le tableau 15 présente les données nécessaires pour cette spécification fonctionnelle.

¹⁴ Lien vers une vidéo démonstrative : https://schunk.com/fr_fr/page-daccueil/adheso/

N°	Fonctions (Principales ou Contraintes)	Spécification quantitative
FP1	Assurer le port du noyau céramique	-
FC1	Permettre de porter une variété de noyaux céramiques	Liste exhaustive des noyaux (poids : $50g < P < 1kg$; complexité ; images des noyaux) ?
FC2	Permettre de tourner et incliner le noyau céramique avec souplesse et flexibilité	3 rotations XYZ ($180^\circ, 120^\circ, 90^\circ$) ?
FC3	Permettre de ressentir les forces appliquées sur le noyau (retour de force)	-
FC4	Ne pas abîmer ou casser le noyau céramique porté	Force maximale à appliquer (N) ?
FC5	Permettre de monter et démonter le noyau céramique rapidement et facilement	Temps maximal de montage (en s) ?
FC6	Permettre la maintenance du système d'assistance	-

Tableau 15. Vers une spécification fonctionnelle du système d'assistance

Ces données fonctionnelles permettraient de faciliter le contact avec des fournisseurs robotiques, et les concepteurs des systèmes mécatroniques. Ces prises de contact permettraient d'enrichir la liste des pistes technologiques potentielles, et permettraient à l'entreprise partenaire de prendre la décision adéquate quant à l'investissement dans ce projet d'assistance.

3. Discussion des résultats et perspectives

Ce cas d'étude a visé l'étude des postes de finition des noyaux céramique dans une perspective d'assistance. Contrairement à l'activité de recyclage des boîtes étudiée dans le chapitre précédent, l'activité de finition comporte de très nombreuses variabilités liées aux différents modèles de noyaux, à la matière et aux étapes précédentes du processus de conception (injection, cuisson) ; cette activité a une complexité très élevée.

Les étapes d'observation, d'entretien et d'analyse ont permis à l'équipe intervenante de comprendre les enjeux liés aux postes de finition, d'identifier les savoirs et savoirs faire mobilisés dans ce travail, de détecter la partie la plus contraignante du travail de finition, et de co-construire une piste d'assistance avec les membres impliqués dans le projet, y compris les opérateurs de finition.

La modélisation des opérations de finition a un rôle majeur dans l'identification du besoin d'assistance. L'approche participative, initiée et entretenue dès le début du projet, a permis l'émergence d'un scénario d'assistance des postes de finition répondant au besoin identifié. Ce scénario d'assistance consiste à la conception d'un système pour assister la main qui porte et prépare le noyau céramique.

Pour développer ce système d'assistance, une étude de faisabilité a été débutée. Les fonctions attendues ont été formalisées et des pistes de solutions technologiques ont été identifiées et discutées.

Pour s'assurer de la pertinence de ces pistes de solutions technologiques vis-à-vis de l'amélioration des conditions de travail, et leur contribution à la prévention des TMS, des tests de faisabilité doivent être conduits avant tout investissement.

Ces étapes de tests doivent englober également les dimensions liées à l'impact du système sur la productivité (nombre de noyaux/temps) et sur la qualité du traitement des noyaux.

L'approche participative du projet doit être entretenue durant les étapes de développement des solutions techniques. L'entreprise partenaire doit éviter de présenter seulement la solution finale aux opérateurs de finition ; mais ces derniers doivent rester mobilisés et doivent être tenus au courant des différentes étapes du développement technologique. En effet, le sens du travail est une dimension primordiale à considérer dans ce type de projets. Si l'entreprise arrive à investir dans une solution d'assistance, l'activité des opérateurs de finition va être transformée. Ce changement doit être accompagné. Potentiellement, une phase transitoire d'adaptation serait nécessaire. L'organisation et le management de proximité auront un rôle important pour favoriser l'acceptabilité de ce projet de transformation.

Conclusion

Ce 2^{ème} cas d'étude visait d'apporter une dimension industrielle opérationnelle à ce travail de recherche. Cette dimension a été apportée à travers la contribution importante de l'analyse du travail réel des postes de finition dans la perspective d'assistance, en visant à permettre aux opérateurs de finition de continuer à effectuer un travail de qualité tout en prévenant les risques des troubles musculo-squelettiques

Les échanges intéressants avec les équipes du partenaire industriel et l'analyse des opérations de finition et des enjeux liés à celles-ci ont permis de guider les étapes de détection du besoin d'usage (la main qui porte le noyau) et de formaliser des pistes d'assistance.

L'analyse de l'activité de finition et la modélisation de ces opérations ont permis de comprendre un travail initialement caractérisé par une grande complexité et une grande variété d'opérations.

Comme les étapes futures du développement vont nécessiter des dépenses importantes, notamment pour les activités de prototypage. L'entreprise partenaire est en train d'étudier les possibilités de financement de cet investissement. Une suite serait donnée à ce projet d'assistance.

Discussion générale

Les deux cas d'études menés dans le cadre de cette thèse ont permis la mise en pratique des trois contributions méthodologiques développées. Comme le résume le tableau suivant :

- Le cadre méthodologique de conduite de projets cobotique a été mis en pratique à travers le cas d'étude 1. Cette contribution méthodologique a facilité le déroulement de ce cas d'étude. En effet, tout au long du cycle de conception (de l'étape d'analyse stratégique du projet jusqu'à l'étape d'évaluation), nous avons une idée claire des développements réalisés et des étapes à venir.
- L'approche ergonomique d'analyse du travail dans une perspective de cobotisation a été mise en pratique à travers le 2^{ème} cas d'étude. Cette proposition méthodologique nous a permis d'analyser les activités humaines de finition des noyaux céramiques (caractérisées au début par leur fortes complexités) et de détecter un besoin d'assistance (assister la main qui porte les noyaux céramiques).
- L'indicateur de choix subjectif proposé dans le cadre de cette thèse a joué un rôle central pendant la comparaison des solutions d'assistance des postes de recyclage des boîtes (cas d'étude 1). Cet indicateur d'évaluation a permis de recueillir les avis des utilisateurs et l'évaluation des dimensions subjectives suite à la phase de test des solutions développées.

Contributions méthodologiques	Mise en pratique	Apports
Le cadre méthodologique de conduite de projets cobotiques	Cas d'étude 1	Facilitation du déroulement du cas d'étude 1
L'approche ergonomique d'analyse du travail dans une perspective de cobotisation	Cas d'étude 2	Analyse des activités humaines de finition des noyaux céramiques et détection du besoin d'assistance
L'indicateur d'évaluation des solutions cobotiques : L'ICS	Cas d'étude 1	Evaluation et comparaison des solutions d'ouverture des boîtes

Tableau 16. Synthèse des apports des contributions méthodologiques développées

Malgré les apports clairs des contributions méthodologiques développées dans le cadre de cette thèse, des limites vis-à-vis des verrous présentés en pages 2 et 3 ont été identifiées. Ces limites représentent des perspectives d'amélioration des contributions développées.

Comme résumé à travers le tableau suivant, les 4 limites principales suivantes ont été identifiées :

- La clarification de la notion de collaboration entre humains et robots repose sur un état de l'art non exhaustif de la notion de collaboration entre humains ;
- Le cadre méthodologique de conduite de projets cobotiques n'assiste pas les phases de conception techniques (étude de faisabilité et détection des solutions technologiques) ;
- L'approche ergonomique d'analyse du travail dans une perspective de cobotisation n'assiste pas l'étape de répartition des tâches entre humains et robots. En effet, la caractérisation des opérations de finition (figure 37) utilisée lors du 2^{ème} cas d'étude, qui a permis la détection du besoin d'assistance, n'est pas utilisable pour tous les postes de travail manuel ;
- L'indicateur de choix subjectif présente une faible prise en compte de la notion du « sens de travail » pendant la phase d'évaluation des dimensions humaines lors des projets de conception des systèmes cobotiques.

Verrous scientifiques	Contributions apportées	Limites principales
Clarifier la notion de « collaboration » entre humains et robots	Etat des lieux de la robotique industrielle & caractéristiques de la collaboration entre humains	Etude bibliographique non exhaustive sur la collaboration entre humains
Encadrer la conduite des projets de conception des systèmes cobotiques pour prendre en compte les dimensions humaines	Le cadre méthodologique de conduite de projets cobotiques	Des étapes de conception non assistées
Outiller l'analyse des systèmes existants dans une perspective de cobotisation	L'approche ergonomique d'analyse du travail dans une perspective de cobotisation	Etape de répartition des tâches non assistée
Outiller l'évaluation des dimensions humaines lors des projets de conception des systèmes cobotiques	L'indicateur d'évaluation des solutions cobotiques : Le ICS	Faible prise en compte de la dimension « sens du travail »

Tableau 17. Synthèse des limites principales des contributions méthodologiques développées

Les travaux menés durant la préparation de cette thèse de doctorat nous ont permis de nous confronter à des verrous scientifiques pluridisciplinaires. En effet, dans l'objectif de proposer à la communauté des outils d'aide à la conception des systèmes cobotiques tenant compte

l'aspect multi-enjeux lié à ces nouvelles évolutions technologiques, cette thèse de doctorat englobe des dimensions liées à l'évolution technologique de la robotique industrielle, à la sécurité des utilisateurs dans les systèmes humains-robots, à la conduite des processus de conception, à la prise en compte des humains dans la conception des systèmes de production, et à l'évaluation multicritère des projets de transformation industrielle.

Nous proposons à travers cette partie, de discuter ces dimensions selon les 4 axes suivants, illustrés en figure 52 :

1. Les enjeux de sécurité et de performance des systèmes humaines-robots ;
2. La transformation du travail par la robotique collaborative ;
3. Les nouvelles technologies et le sens du travail ;
4. La conduite de projet pluridisciplinaire : Apports et challenges.

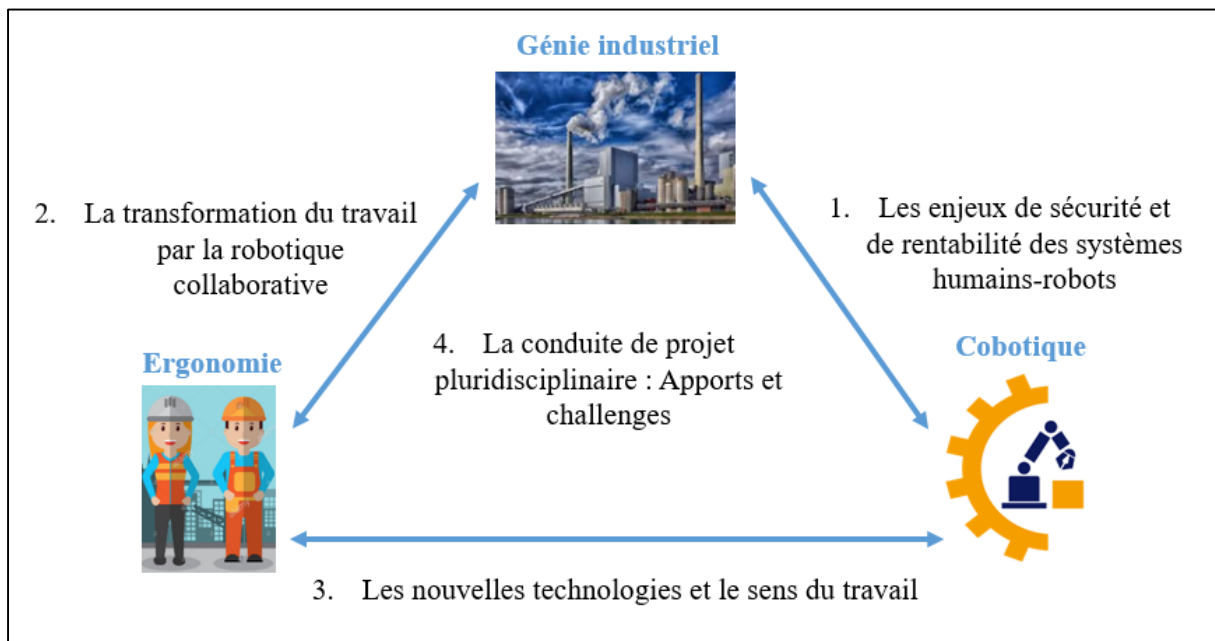


Figure 52. Illustration des axes de discussion

1. Les enjeux de sécurité et de performance des systèmes humains-robots

Les enjeux de sécurité liés à la robotique collaborative sont majeurs. En effet, la possibilité du partage du même espace de travail avec les opérateurs humains, qui représente l'évolution majeure de ces nouvelles générations de robots, représente en même temps un risque important pour la sécurité des opérateurs humains. Malgré l'évolution des normes de sécurité encadrant le domaine des applications robotiques pour accompagner cette évolution, une partie considérable du risque reste toujours présente. Cette partie du risque dépend du contexte de l'application robotique, des effecteurs utilisés, de l'environnement de mise en place, etc.

Ces enjeux de sécurité impactent de manière directe les niveaux d'interaction entre opérateurs et robots. Ils expliquent également, de partie, le faible pourcentage des applications robotiques réellement interactives.

Dans le cadre de notre 1^{er} cas d'étude d'assistance des opérations de recyclage des boîtes, c'est l'arrêt nominal de sécurité qui a été adopté. Ce mode de fonctionnement a permis de répondre à la fois au scénario de fonctionnement choisi, et de limiter considérablement les risques pour les utilisateurs.

Dans le cadre du 2^e cas d'étude, c'est le guidage manuel qui serait adopté. Le besoin de coordination des deux mains, et le ressenti du retour des forces nécessiteront un contact permanent entre les opérateurs de finition et le système d'assistance.

Des axes de recherche importants visant l'amélioration de la sûreté des applications robotiques collaboratives sont de plus en plus fréquents (Safeea, 2020). Des perspectives d'évolution des degrés d'interaction entre humains et robots en contexte industriel sont attendues.

Les degrés importants d'interaction ou de « collaboration » entre opérateurs humains et robots ne doivent pas être des objectifs en eux même, mais ils doivent être perçus comme des possibilités offertes par l'évolution technologique pour répondre à un spectre plus large des besoins d'assistance. En effet, la mise en place d'une cellule robotique collaborative est un investissement, auquel des coûts importants sont liés. Durant l'étude des projets d'assistance mobilisant des robots collaboratifs, l'équipe de conception doit se focaliser plus sur « le besoin d'usage » que sur les degrés d'interaction. Ceci éviterait d'entreprendre des investissements à non-valeurs ajoutées.

La performance, la rentabilité, l'impact du nouveau système sur la qualité des produits et encore la prévision des opérations de maintenance sont des dimensions importantes qui doivent être étudiées durant la conception et l'évaluation des solutions robotiques potentielles. Ces dimensions liées au retour sur investissement doivent être étudiées avec précaution, et être adaptées en fonction de chaque contexte, sans tomber dans le piège « des formules prêtes » de calcul du retour sur investissement. Par exemple, dans le cadre de notre 1^{er} cas d'étude, la solution retenue, n'était pas la solution la plus productive, et l'entreprise partenaire est consciente que la mise en place de la cellule robotique collaborative aurait une performance (nombre de pièce recyclée par min) inférieure à la performance de recyclage actuelle, mais la solution a été quand même validée. Ceci est dû à deux facteurs, d'une part, le besoin initial visait la suppression d'une opération contraignante (l'ouverture de boîtes). D'une autre part, d'un point de vue valeur ajoutée pour le client, les opérations de recyclage sont considérées « à non-valeur ajoutée ». Un retard en recyclage, n'impactera pas le temps de cycle réel de production de l'entreprise, qui représente le temps de transformation des matières premières en produits finis.

Cette dernière dimension ouvre une discussion importante sur les dimensions qui peuvent être prises en compte durant l'estimation du retour sur investissement d'un projet de transformation industrielle.

2. La transformation du travail par la robotique collaborative

L'introduction d'une nouvelle technologie dans un milieu industriel est une transformation importante dans un système organisationnel, collectif et social. C'est également un investissement, souvent, très important.

À ces transformations et nouvelles évolutions technologiques, un effet de mode important est associé. Ceci est dû à la fois aux publicités et promesses liées à ces technologies, mais aussi aux programmes de financement incitatifs initiés par des instances publiques.

Pour éviter d'entreprendre des investissements inutiles et engendrer des changements troublants dans les systèmes de production actuels, ces nouvelles technologies doivent être approchées avec précaution, en évitant de les mobiliser en mode flux poussé, à travers la recherche des problèmes en interne, pour lesquels une technologie précise peut apporter des réponses. Elles doivent plutôt être mobilisées pour répondre à des besoins d'usages précis, identifiés auparavant.

En ce qui concerne la robotique collaborative, parmi les besoins souvent exprimés en lien avec cette technologie, on retrouve l'assistance des postes de travail contraignants. En effet, dans plusieurs situations, la robotique collaborative peut apporter des solutions d'assistance pour des tâches manuelles. Cependant, cette technologie ne doit pas être considérée comme solution standard adaptée à tout poste de travail manuel.

Pour s'assurer de la conformité de cette technologie avec les postes de travail visés, avec leur organisation, et leurs sources de variabilité, une analyse approfondie du système existant et des enjeux liés au projet doit être engagée dès son début, et une évaluation continue des solutions émergentes doit se poursuivre jusqu'à la fin du projet. Cette analyse et ces étapes d'évaluation continue permettront de s'assurer que la technologie mobilisée, le scénario d'assistance choisi et la solution conçue, sont en adéquation avec les nécessités des postes de travail à assister, qu'ils répondent bien au besoin d'usage défini, et qu'ils prennent en compte les sources de variabilité du poste de travail assisté.

Dans le cadre de notre 1^{er} cas d'étude, le besoin d'usage était clair et précis : assister l'opération d'ouverture des boîtes pour faciliter les opérations de recyclage des boîtes. Ceci a permis de se focaliser sur le besoin réel, et de concevoir les solutions adaptées de manière efficace.

En revanche, pour le 2^e cas d'étude, le besoin n'était pas précis, et des phases importantes d'analyse des enjeux du projet, et d'analyse des postes de travail de finition ont été engagées pour définir quelle partie du travail de finition devrait être assistée, pour identifier les enjeux liés à ces postes de travail. Ces étapes ont permis de s'assurer du besoin d'usage et de préciser les nécessités du travail de finition, ce qui permettra par la suite d'avancer vers des solutions d'assistance avec précaution.

Le système d'assistance conçu dans le cadre du 1^{er} cas d'étude, transforme complètement le poste de recyclage des boîtes, il transforme également le rôle des opérateurs travaillant à ce

poste de travail. Avant, ils effectuaient des opérations de recyclage des boîtes ; suite au projet d'assistance, ils superviseront une cellule robotique de recyclage des boîtes. Cette transformation du poste de travail, a engendré également une transformation du travail des opérateurs humains et de leurs rôles.

Lors des projets de transformation, ce type de changement important doit être accepté par les futurs utilisateurs, ce qui questionne les conditions d'acceptabilité d'une transformation industrielle.

3. Les nouvelles technologies et le sens du travail

Transformer un système de production, c'est aussi transformer un système socio-organisationnel, et impacter le sens du travail des utilisateurs futurs de ce système. Cette dimension est fondamentale durant les projets de transformation. En effet, un système conçu, suite à un investissement important, pour répondre à un besoin d'usage réel et précis, s'il n'est pas accepté par les personnes qui vont l'utiliser, a de fortes chances d'être rejeté.

Cette notion d'acceptabilité d'un changement important ou d'une transformation industrielle doit être prise en compte durant les projets de transformation.

Pour favoriser l'acceptabilité d'un projet de transformation, la dimension d'acceptabilité doit être travaillée dès le début du projet. Les personnes impactées par le projet de transformation doivent être identifiées et intégrées à l'équipe de conception dès la première phase de discussion.

La participation des opérateurs et des personnes impactées par le projet (mangement de proximité, etc.) ne doit pas se limiter à la phase de présentation du projet ou à la phase d'analyse de l'existant. Ces parties prenantes doivent rester mobilisées tout au long du processus de conception. Par la connaissance et la maîtrise de leurs postes de travail, ces collaborateurs auront un rôle central dans la phase d'analyse de l'existant, de construction des scénarios d'assistance, d'évaluation continue des solutions en conception, et de test de la solution finale.

Cette mobilisation effective des opérateurs humains facilitera la dimension d'appropriation des systèmes futurs, permettra d'identifier les tâches à cobotiser en priorité, et d'identifier les composantes du travail à préserver et à ne pas impacter. Par exemple, pour le 2^e cas d'étude de cette thèse, le rapport des opérateurs de finition avec la matière (le toucher) est à préserver. En effet, les entretiens avec les opérateurs de finition ont révélé que la réalisation d'une « finition de qualité » d'un noyau céramique passe par une attention particulière portée aux noyaux par les opérateurs de finition.

Même après la fin du processus de conception et la mise en place de la nouvelle technologie, le nouveau système doit être suivi et réévalué pour apporter, si nécessaire, toutes les modifications adaptées. Car il existe une différence importante entre acceptabilité d'une transformation potentielle et acceptation d'une technologie mise en place.

4. La conduite de projet pluridisciplinaire : Apports et difficultés

L'aspect multi-enjeux englobant la sécurité, la faisabilité technologique, la performance, les facteurs humains, et le sens du travail, lié à la robotique collaborative nécessite une conception pluridisciplinaire, mobilisant des compétences complémentaires pour répondre à ces enjeux multiples.

Dans le cadre du projet de recherche HECTOR, visant l'étude de la place des humains durant les projets de cobotisation, la mobilisation des chercheurs ayant des spécialités et compétences complémentaires a permis de dresser une analyse multipoints de vue, et d'apporter des contributions complémentaires pour répondre à la problématique du projet.

Par exemple, dans le cadre du 2^e cas d'étude, l'apport des compétences venant des disciplines engagées dans le projet (ergonomie, la robotique, le génie industriel) est très clair. La mobilisation d'une équipe pluridisciplinaire (un ergonomiste, des ingénieurs) a permis de mener l'analyse ergonomique de l'activité de finition, d'identifier la piste d'assistance, de formaliser les fonctions attendues du système d'assistance et d'identifier les briques technologiques potentielles.

Pour la partie d'analyse et de modélisation des postes de finition, les compétences venant d'ergonomie ont joué un rôle majeur pour décortiquer le travail de finition et identifier les nécessités de ce travail manuel. Les compétences venant de l'ingénierie ont permis la formalisation des fonctions attendues du système futur et l'identification des pistes technologiques.

Pour réussir cette conception pluridisciplinaire, des efforts importants ont été fournis pour réussir les différentes sous-étapes d'analyse de l'activité de finition, à travers les nombreuses journées d'observation outillée, les phases d'entretiens enregistrés, l'analyse des vidéos et des enregistrements audio, etc.

Cette collaboration a été facilitée par la volonté de co-construire, et l'objectif d'aboutir à une prise en compte effective des facteurs humains, notamment avec la compréhension approfondie de l'activité visée par le projet d'assistance.

Conclusion générale et perspectives

L'apparition des robots collaboratifs pouvant partager le même espace de travail avec les opérateurs humains, et l'évolution des normes de sécurité pour encadrer cette évolution représentent des évolutions majeures dans le domaine de la robotique industrielle. Ces nouvelles technologies offrent de nouvelles opportunités d'application et d'usage.

De par la multiplicité des enjeux liés aux robots collaboratifs, ces nouveaux moyens technologiques engendrent des débats multidisciplinaires englobant la sécurité des utilisateurs, la performance des nouveaux systèmes, et l'impact sur les conditions et le sens du travail. Ce qui confirme le besoin de contributions méthodologiques de conduite des processus de conception centrées sur l'humain et prenant en compte les différents enjeux liés à la cobotique.

A travers cette thèse, nous avons cherché à développer des outils d'aide à la conception des systèmes cobotiques prenant en compte les enjeux de sécurité, de performance et de santé au travail. Ces outils, à destination des acteurs de conduite des projets de transformation englobant des robots collaboratifs, visent à permettre :

- Une conduite de projet participative et itérative, prenant en compte l'aspect multi-enjeux lié à la robotique collaborative et favorisant l'acceptabilité des futurs systèmes ;
- De mener une analyse ergonomique du travail dans une perspective de cobotisation, qui permet de comprendre la valeur du travail humain pour gérer la variabilité industrielle au quotidien, et d'identifier les tâches à viser en priorité par l'éventuel système cobotique.
- De mener une évaluation multicritère et s'assurer que l'ensemble des dimensions liées au projet cobotique sont effectivement prises en compte.

Ces propositions méthodologiques développées dans le cadre de cette thèse ont été inspirées de contributions scientifiques issues de plusieurs disciplines, s'intéressant à la prise en compte des utilisateurs lors des processus de conception. Elles ont été mises en pratique dans le cadre de deux cas d'étude complémentaires.

Dans le cadre du premier cas d'étude, visant l'assistance du poste de recyclage des boîtes, les étapes du cadre méthodologique de conduite du processus de conception des systèmes cobotiques ont été suivies, de l'analyse stratégique du projet, jusqu'à l'évaluation finale des solutions développées. Ils ont permis le développement de plusieurs solutions répondant au besoin d'usage identifié. L'indicateur du choix subjectif a été testé, il s'est révélé déterminant lors du choix de la solution la plus adaptée dans le cadre de ce cas d'étude.

Pour remédier à l'absence du caractère 'réaliste' lors de l'étape d'analyse de l'existant dans le cadre du premier cas d'étude, un deuxième cas d'étude industriel a été entamé. Ce 2^e cas d'étude a apporté une dimension industrielle opérationnelle à ce travail de recherche. Cette dimension a été apportée à travers la mise en pratique de la 2^{ème} contribution méthodologique de ce travail de thèse.

Dans le cadre de ce 2^e cas d'étude, l'analyse de l'activité de finition et la modélisation de ces opérations ont permis de comprendre un travail initialement caractérisé par une grande complexité et une grande variété d'opérations, d'identifier un besoin d'assistance (la main qui porte les noyaux) et de co-construire avec les opérateurs de finition un scénario d'assistance visant à limiter des sollicitations dangereuses et prévenir des risques de TMS. Les possibilités de financement de ce projet d'assistance sont en train d'être étudiées par le partenaire industriel, et des suites seraient données à ce travail de recherche et développement.

En termes de perspectives, l'aide à la conception visée par le cadre méthodologique peut être renforcée en assistant la phase d'étude de faisabilité technologique. Cette perspective d'amélioration du cadre méthodologique développé repose sur la proposition d'une étape supplémentaire de « Spécification des fonctions d'interaction attendues », après la phase de construction et évaluation collective des scénarios de cobotisation. Cette étape permettra d'expliciter le niveau et les modalités d'interaction nécessaires, ainsi que les fonctionnalités de l'interface Homme-Robot et de la commande du cobot. Ce qui permettrait d'identifier les caractéristiques techniques de la solution et d'orienter directement vers des pistes de solutions technologiques. La figure suivante illustre cette perspective d'amélioration.

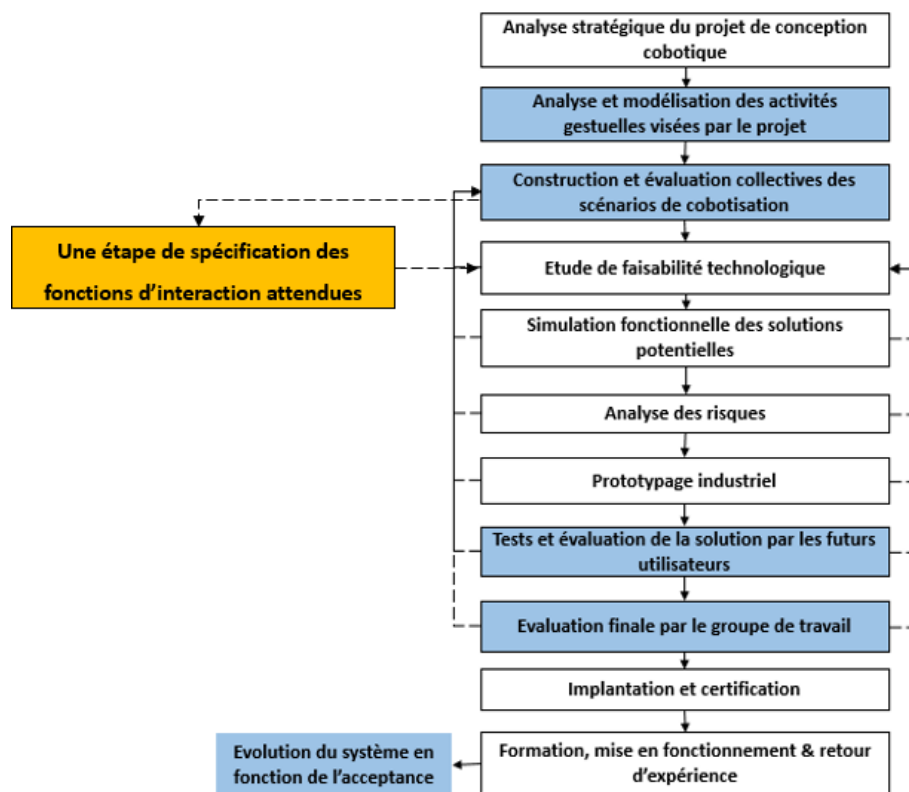


Figure 53. Illustration de la perspective d'amélioration du cadre méthodologique de conduite du processus de conception

L'indicateur de choix subjectif proposé dans le cadre de cette thèse peut également être amélioré. En effet, une meilleure intégration de la notion du « sens du travail » lors des phases d'évaluation des systèmes cobotiques développés permettra de dresser cette dimension subjective essentielle de ce type de projets de transformation. L'intégration de cette dimension

subjective nécessitera un travail rigoureux englobant l'étude de la notion du « sens de travail », de ses caractéristiques, et de sa construction et son évolution.

Les propositions méthodologiques développées dans le cadre de cette thèse, visent à orienter vers une conception prenant en compte les facteurs humains et l'aspect multi-enjeux lié à la robotique collaborative ; elles ne revendiquent donc pas l'automatisation du processus de conception. Au contraire, ils soulignent l'importance de la prise en compte du contexte et particularités de chaque poste de travail visé par un projet de cobotisation.

Ces contributions méthodologiques peuvent être réadaptées pour convenir à d'autres types de transformations industrielles. Néanmoins, les enjeux particuliers liés à la technologie mobilisée dans le cadre de cette transformation doivent être pris en compte. À titre d'exemple, pour un projet mobilisant les jumeaux numériques, il conviendrait d'intégrer la dimension de santé cognitive et la prévention de la fatigue oculaire numérique.

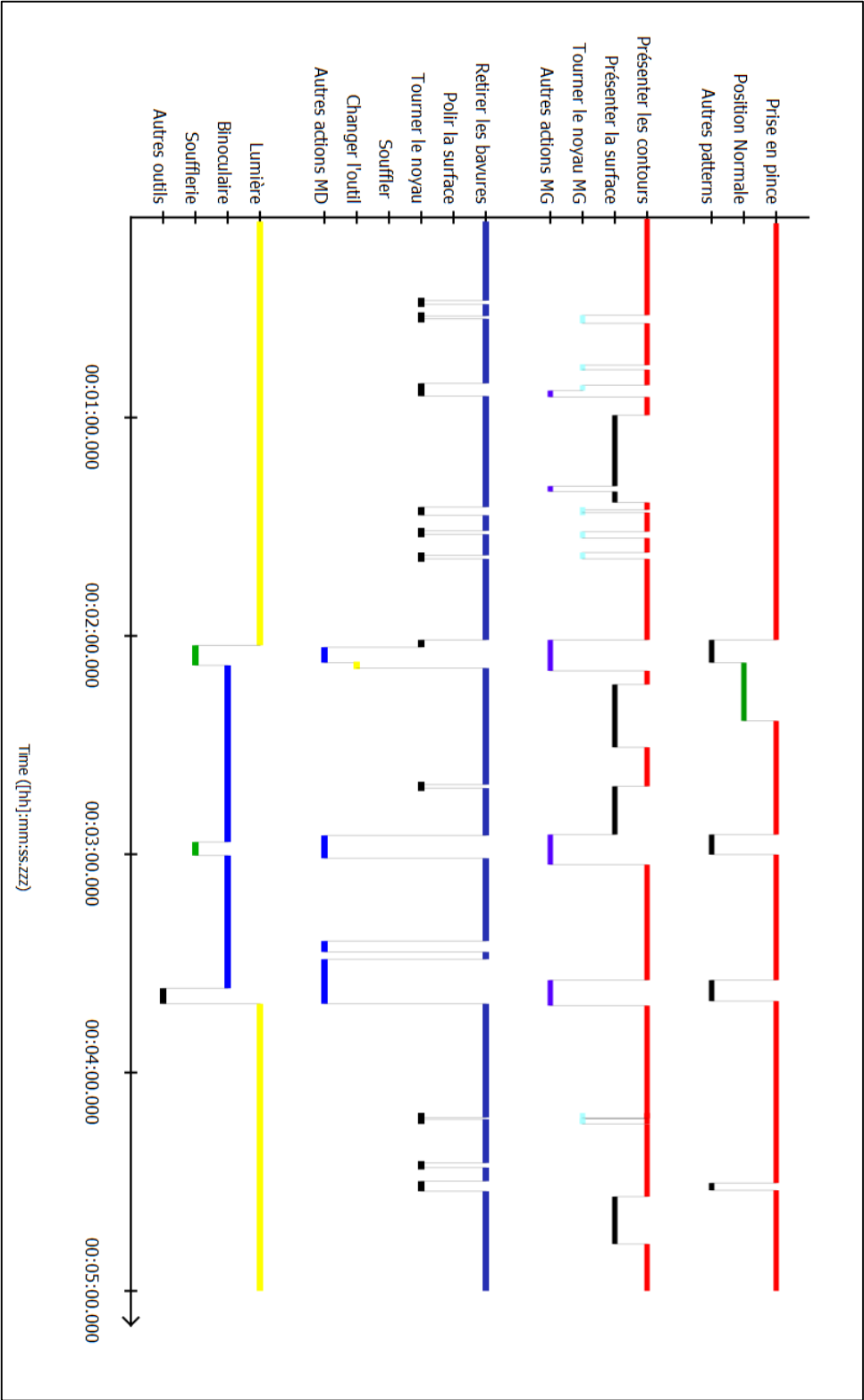
Dans le cadre de ces travaux de thèse, l'élaboration des propositions méthodologiques d'aide à la conception, et la conduite des deux cas d'étude ont mobilisé une équipe pluridisciplinaire englobant des compétences en génie industriel, en ergonomie et en robotique. La mobilisation de ces compétences transdisciplinaires ouvre des perspectives vers des formations intégrant les différentes compétences nécessaires pour dresser les enjeux sociétaux d'aujourd'hui (humains, technologiques, économiques, environnementaux, etc.).

Annexes :

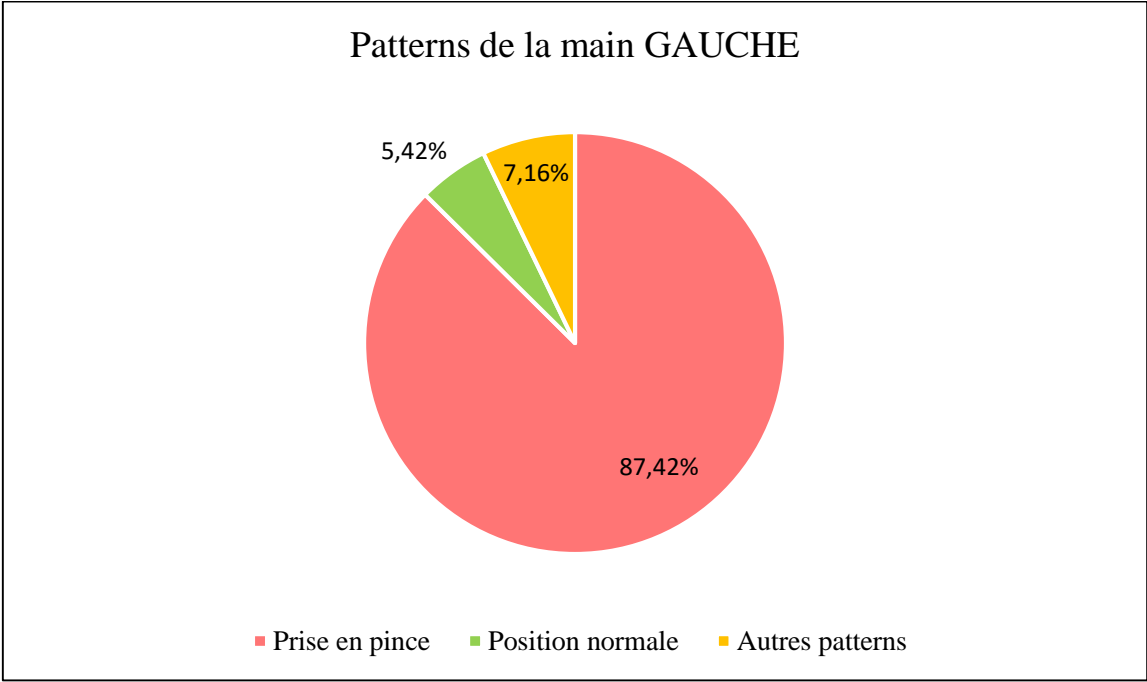
Annexe 1 : Données collectées pour calculer le SCI

SCI details (%)	Solution 1	Solution 2	Solution 3
Volunteer 1: A1	25	75	75
Volunteer 1: A2	0	100	50
Volunteer 1: A3	100	75	50
Volunteer 1: A4	0	75	50
Volunteer 2: A1	25	100	75
Volunteer 2: A2	25	75	50
Volunteer 2: A3	100	100	50
Volunteer 2: A4	0	100	50
Volunteer 3: A1	25	100	50
Volunteer 3: A2	25	100	25
Volunteer 3: A3	100	75	25
Volunteer 3: A4	25	100	50
Volunteer 4: A1	0	75	75
Volunteer 4: A2	0	75	25
Volunteer 4: A3	75	75	50
Volunteer 4: A4	0	75	25
Volunteer 5: A1	25	75	50
Volunteer 5: A2	25	100	50
Volunteer 5: A3	100	75	50
Volunteer 5: A4	25	75	25

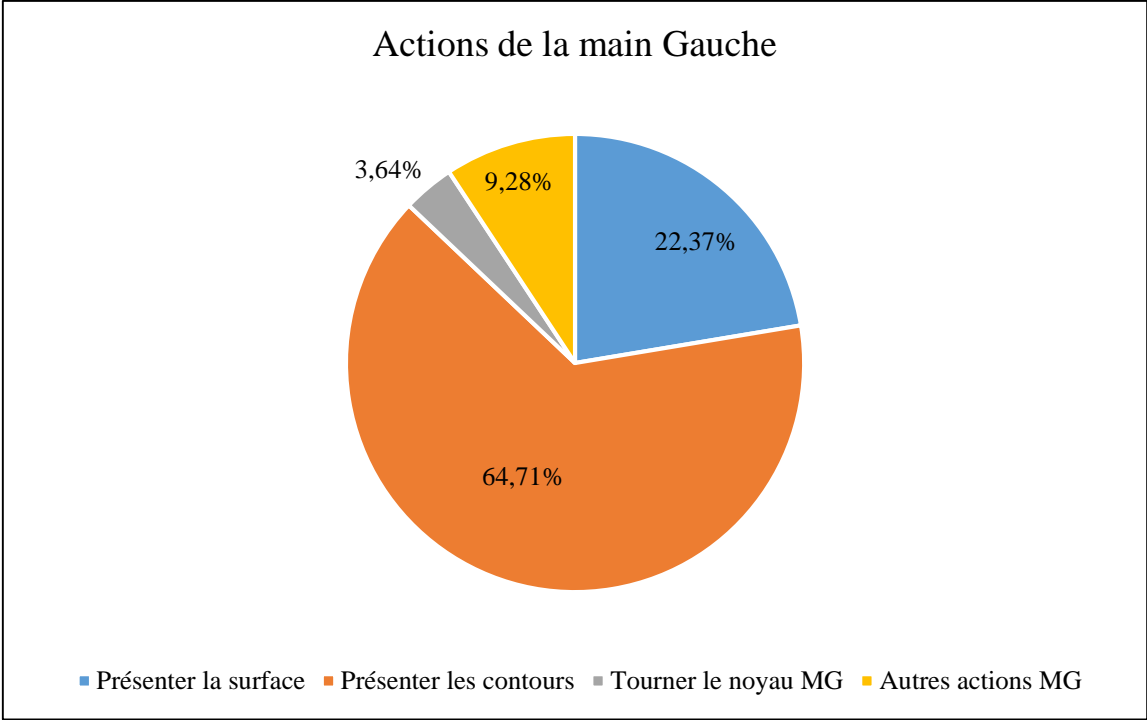
Annexe 2 : 3^{ème} Chronique (opérateur C) d'analyse des opérations de finition



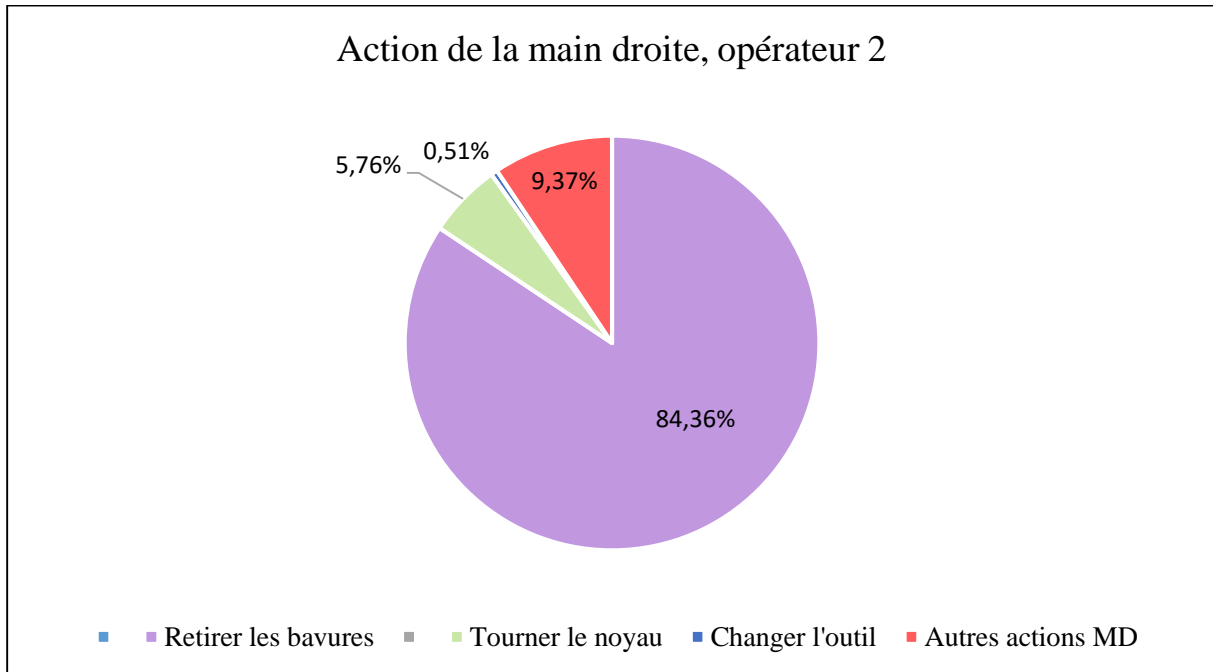
Annexe 3 : Patterns de la main Gauche, Opérateur C



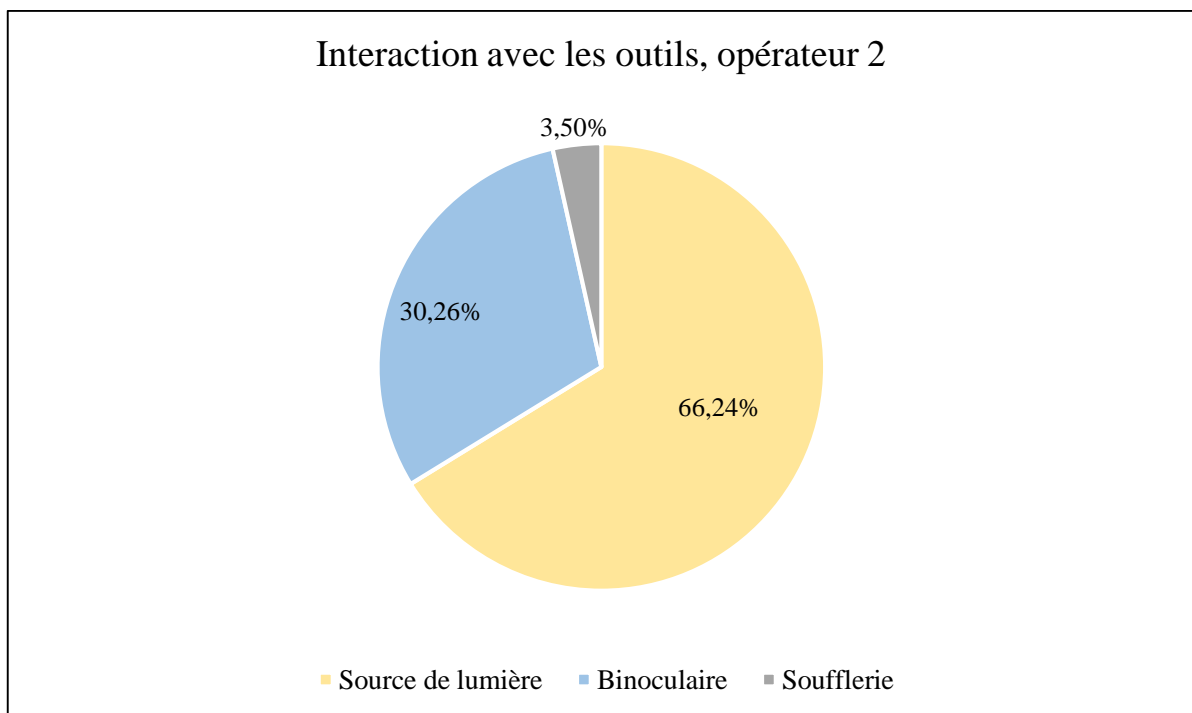
Annexe 4 : Actions de la main Gauche, Opérateur C



Annexe 5 : Actions de la main droite, opérateur C



Annexe 6 : Graphe d'interaction avec les outils du poste de travail, opérateur C



Valorisations scientifiques et académiques

❖ Valorisations scientifiques :

- Conférences Nationales :

M. Bounouar, R. Bearee R, T-H. Benchekroun and A. Siadat, "Etat des lieux de la cobotique industrielle et de la conduite de projet associée" acte de : 16ème édition S-mart colloque (AIP-Primeca), Les Karellis-France, 2019. <https://smart2019.event.univ-lorraine.fr/243184>.

M. Bounouar, R. Bearee, A. Siadat and T-H. Benchekroun, "L'ergonomie, la robotique collaborative et le génie industriel : Vers une méthodologie de conception pluridisciplinaire des systèmes Hommes Robots". Actes du 55ème Congrès de la SELF, L'activité et ses frontières. Penser et agir sur les transformations de nos sociétés. Paris, 16, 17 et 18 septembre 2020.

- Conférences Internationales :

M. Bounouar, R. Bearee, A. Siadat, N. Klement and T-H. Benchekroun, "User-centered design of a collaborative robotic system for an industrial recycling operation" in IEEE Access 2020.

M. Bounouar, R. Bearee, A. Siadat, T-H. Benchekroun, "Vers un cadre méthodologique de conception des systèmes humains-robots". 13ème Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation (MOSIM2020), 12-14 Nov 2020, Agadir, Maroc. hal-03158761.

T-H. Benchekroun, **M. Bounouar**, R. Bearee, A. Siadat, 2021. "Industry of the Future, Future of Work: The Case of Collaborative Robotics". In book: Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2021), Volume I: Systems and Macroergonomics. Publisher: Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-74602-5_5

F. Barcellini, W. Buchmann, R. Bearee, T-H. Benchekroun, **M. Bounouar**, G. Dubey, C. Moricot, A-C. Lafeuillade, C. Rosselin-Bareille, M. Saraceno, A. Siadat. 2021. "Collaborative Robotics and Industry 4.0: An Engineering, Sociology and Activity-Centered Ergonomics Cross-Experience". In book: Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2021). Publisher: Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-74614-8_74

- Revues Internationales :

M. Bounouar, R. Bearee, A. Siadat and T-H. Benchekroun, "On the role of human operators in the design process of cobotic systems", Cognition, Technology and Work.

Valorisations académiques :

- Septembre 2019- février 2020 : Préparation et encadrement d'un projet-étudiant pour des élèves ingénieurs de 3^{ème} année, à l'école des Arts et Métiers de Lille. Le projet visait l'initiation à la prise en compte des facteurs humains lors des projets de transformation, avec une partie pratique englobant la robotique collaborative pour assister un poste de travail.
- Février 2021 : Préparation et animation d'un cours de 4 H pour des étudiants-ergonomes en 2^{ème} année de Master, au Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris. Le cours est intitulé : « Analyser et modéliser pour concevoir – Le cas de la cobotique industrielle ».
- Présentation du sujet et des résultats de thèse lors :
 - ❖ D'une journée de travail HECTOR-INRS : avril 2019 à l'INRS-Paris ;
 - ❖ Des journées GDR-MACS : février 2020 à Nantes ;
 - ❖ Du séminaire de l'équipe ergonomie du CNAM-Paris : juin 2021 à Paris.

Bibliographie

- Barcellini, F., Van Belleghem, L., Daniellou, F. (2013). Les projets de conception comme opportunité de développement des activités. In Falzon P. (dir) Ergonomie constructive, University Presses of France, pp 191-206. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00860635>
- Bélangier, J. (1991). Compte rendu de [Le travail insignifiant, par Denis Carrier, Montréal, Éditions Guérin, 1991, 183 pages.] Service social, 40(2), 151–153. <https://doi.org/10.7202/706537ar>
- Bencheikroun, T-H. (2015). Intervenir en ergonomie : analyser le travail pour le comprendre et transformer le travail pour le concevoir. Proceedings of the 51st SELF Congress, Marseille-France, 21-23.
- Bencheikroun, T. (2017). Organiser la participation et l’agir collectif pour rendre le travail supportable : Commentaire. Sciences sociales et santé, 35, 97-104. <https://doi.org/10.3917/sss.354.0097>
- Bencheikroun, T-H. et Weill-Fassina, A. (2000) Le travail collectif : Perspectives actuelles en ergonomie. Octares Editions : Toulouse-France.
- Bitonneau, D. (2018). Conception de systèmes cobotiques industriels : approche robotique avec prise en compte des facteurs humains : application à l’industrie manufacturière au sein de safran et ariane group. PhD thesis: automatic/robotics.
- Boehm, BW. (1981). Software engineering economics. Prentice-hall, englewood cliffs, nj.
- Boehm, BW., Gray, TE., Seewaldt, T. (1984) prototyping versus specifying: a multiproject experiment. IEEE trans. Software eng., se-10(3):290-303, may.
- Bodker, S. (1999) Scenarios in user-centred design-setting the stage for reflection and action. Proceedings of the 32nd Annual Hawaii International Conference on Systems Sciences. Doi: 10.1109/HICSS.1999.772892.
- Bogh, S., Hvilshoj, M., Kristiansen, M., Madsen, O. (2012). Identifying and evaluating suitable tasks for autonomous industrial mobile manipulators (AIMM), Int. J. Adv. Manuf. Technol. 61(5-8), 713–726.
- Bordel, S., Somat, A., Hervé, B., Anceaux, F., Greffeuille, C., Menguy, G., Pacaux, M-P., Subirat, P., Terrade, F., Gallenne, M-L. (2014). From technological acceptability to appropriation

by users: Methodological steps for device assessment in road safety. *Accident Analysis & Prevention* Volume 67, June 2014, pp 159-165. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.01.016>

Bounouar, M., Béaree, R., Benchekroun, T-H., Siadat, A. (2019). *Etat des lieux de la cobotique industrielle et de la conduite de projet associée*. 16ème édition S-mart colloque (AIP-Primeca), Les Karellis-France, 2019. <https://smart2019.event.univ-lorraine.fr/243184>

Boy G-A (2013) *Orchestrating Human-Centered Design*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4339-0>

Boy G-A and Narkevicius J-M (2014) *Unifying Human Centered Design and Systems Engineering for Human Systems Integration*. In *Complex Systems Design & Management*, pp 151-162, Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02812-5_12

Brooke J. (1996). SUS: a "quick and dirty" usability scale. In p.w. Jordan, b. Thomas, b.a.weerdmeester & i. McClelland (eds.), *usability evaluation in industry*, pp. 189–194. London: Taylor & Francis.

Brooke, J. (2013) 0 Sus: a retrospective. *Journal of usability studies*, 8(2), pp 29–40.

Brown T, Barry K (2011) Change by design. *Journal of product innovation management* 28, pp 381-383. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2011.00806.x>

Buur Jacob and Soendergaard Astrid (2000) Video card game: an augmented environment for user centred design discussions. In *Proceedings of DARE 2000 on Designing augmented reality environments (DARE '00)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp 63–69. Doi:<https://doi.org/10.1145/354666.354673>

Caffiau, S. (2009). *Approche dirigée par les modèles pour la conception et la validation des applications interactives : une démarche basée sur la modélisation des tâches*. Informatique [cs]. Isae-ensma école nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique - Poitiers. Français. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00461497>

Chellali, A. (2009). *Étude des interactions homme-homme pour l'élaboration du référentiel commun dans les environnements virtuels collaboratifs*. Interface homme-machine [cs.HC]. Université de Nantes, 2009. Français. (tel-00467441v2)

Cherubini A, Passama R, Crosnier A, Lasnier A, Fraisse P. (2016). Collaborative manufacturing with physical human–robot interaction. *Robot Comput Integr Manuf* 40:1–13.

Clarke, A., & Smyth, M. (1993). A Co-Operative Computer Based on the Principles of Human Co-Operation. *Int. J. Man Mach. Stud.*, 38, 3-22.

- Colgate, J. E., Wannasuphprasit, W., Peshkin, M. A. (1996). Cobots: Robots for Collaboration with Human Operators. International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, (pp. 433-439). Atlanta, GA
- Colgate, J. E. and Peshkin, M. A. (1999). Cobots. US5952796A.
- Coutaz, J. (1987). PAC an implementation model for the user interface. IFIP TC13 human-computer interaction (interact'87), Stuttgart-North-Holland, pp. 431-436.
- Curtis B, Hefley B (1994) a wimp no more, the maturing of user interface engineering. Interactions 1(1), pp 22–34. <https://doi.org/10.1145/174800.174803>
- Daniellou, F. (1987). Les modalités d'une ergonomie de conception, son introduction dans la conduite des projets industriels. Documentary note nd 1647- 129-87, Paris: INRS.
- Davis, FD. (1989), Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *Mis q*, 13 (3): pp 319-40. <https://doi.org/10.2307/249008>
- Deutsch, M. (1962). Cooperation and trust: Some theoretical notes. In M. R. Jones (Ed.), *Nebraska Symposium on Motivation*, 1962 (p. 275–320). Univer. Nebraska Press.
- Direction Générale des Entreprises (France). (2015). *Technologies Clés 2020*.
- Dishaw M-T, Strong, D-M (1999) Extending the technology acceptance model with task–technology fit constructs. *Information & management*, 36 (1), pp 9-21. [https://doi.org/10.1016/s0378-7206\(98\)00101-3](https://doi.org/10.1016/s0378-7206(98)00101-3)
- Doll, W.J., Torkzadeh, G. (1988). The measurement of end-user computing satisfaction. *Mis quarterly*, 12, pp 259-272. <http://dx.doi.org/10.2307/248851>
- Fontmarty M., Germa T., Burger B., Marin L-F., Knoop, S. (2007). Implementation of human perception algorithms on a mobile robot. *IFAC Proceedings Volumes: Volume 40, Issue 15, 2007, Pages 361-366*. <https://doi.org/10.3182/20070903-3-FR-2921.00062>.
- Finstad, K (2010) The usability metric for user experience. *Interacting with computers*, 22(5), pp 323–327. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2010.04.004>
- Fitts D, Sandor A, Litaker H, Tillman Jr. B. (2008) *Human Factors in Human Systems Integration*. Houston, TX: NASA Johnson Space Center.
- Garrigou A, Thibault J-F, Jackson M, Mascia F (2001) Contributions et démarche de l'ergonomie dans les processus de conception. *Pistes*, 3(2), pp 1-20. <https://journals.openedition.org/pistes/3725>

- Garrigou A, Carballeda G, Daniellou F (1994) The contribution of activity analysis to the understanding of maintenance difficulties in high-risk process control plant. In Aghazadeh F, advances in industrial ergonomics and safety VI. Taylor & Francis, London, pp 199- 206.
- Garrigou, A. Daniellou, F., Carballeda, G., Ruaud, S. (1995). Activity analysis in participatory design and analysis of participatory design activity. *International journal of industrial ergonomics*, 15, pp 311-327.
- Goodhue, D.L., Thompson, L. (1995). Task-technology fit and individual performance. *Mis quarterly* 213-236. He, w., qiao, q., & wei, k.-k. (2009). Social relationship and its role in knowledge management systems usage. *Information & management*, 46(3), pp 175-180.
- Guide de prévention à destination des fabricants et des utilisateurs Pour la mise en œuvre des applications collaboratives robotisées. Edition 2017, Ministère du travail, France.
- Haeflinger R. (2017). Prévention dans le domaine de la robotique collaborative Synthèse de travaux réalisés à l'international. EUROGIP - Paris Réf. Eurogip-129/F novembre 2017. ISBN : 979-10-91290-89-0
- Hartson, HR., Boehm, D. (1993). User interface development processes and methodologies. *Behav info technol* 12(2), pp 98–114. <https://doi.org/10.1080/01449299308924371>
- Hägele, M., Nilsson, K., Pires, J. N. and Bischoff, R. (2016). Industrial robotics. In: Siciliano, B. & Khatib, O (Eds.) *Springer Handbook of Robotics*. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 1395-1421.
- Hix, D., Hartson, H-R. (1993). *Developing user interfaces: ensuring usability through product and process*. New York: John Wiley and Sons.
- Hoc, J-M., and Lemoine, M-P. (1998). Cognitive Evaluation of Human-Human and Human-Machine Cooperation Modes in Air Traffic Control. *International Journal of Aviation Psychology*, 8(1), pp 1-32.
- Hunt, D. (1983). *Industrial Robotics Handbook*. Industrial, New York 1983.
- INRS. (2018). Robots collaboratifs- Risques. <http://www.inrs.fr/risques/robots-collaboratifs/ce-qu-il-faut-retenir.html>
- ISO 10218-2. Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 2: Robot systems and integration. 2011.
- ISO 8373. Robots and robotic devices – Vocabulary. 2012.

- ISO 9241-210 (2010) Ergonomics of Human-System Interaction, part 210: Human-centred design for interactive systems. Geneva: international organization standardization.
- ISO/TS 15066. Robots and robotic devices – Collaborative robots. 2016.
- Jocelyn, F., Burlet-Vienney D., Giraud L., Sghaier A. (2017). Robotique collaborative : Évaluation des fonctions de sécurité et retour d'expérience des travailleurs, utilisateurs et intégrateurs au Québec, Rapport scientifique.
- Kolski. C. (1995). Méthodes et modèles de conception et d'évaluation des interfaces homme-machine. Interface homme-machine [cs.HC]. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 1995. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01300869>
- Kulić, Croft E (2007) Affective state estimation for human-robot interaction. IEEE transactions on robotics, vol. 23, no. 5, pp 991–1000.
- Lafeuillade, A.C., Barcellini, F., Buchmann, W. & Benchekroun, T.H. (2020). Integrating collaborative robotics in work situations: The intentions of SME managers in the digital transformation of their companies. In M.E Bobillier-Chaumon (Ed.) Digital Transformations in the Challenge of Activity and Employees : understanding and Supporting Emerging Technological Change.
- Lewis, J.R. (1995). IBM computer usability satisfaction questionnaires: psychometric evaluation and instructions for use. International journal of Human Computer Interactions, 7, pp 57-78. <http://doi.org/10.1080/10447319509526110>.
- Maline, J. (1994). Simuler le travail. Editions de l'ANACT, Lyon-France.
- Marx, K. (1867). Capital: A critique of political economy. Volume 1, Part 1: The process of capitalist production, New York: Cosimo.
- Mathieu F, Hillen V (2016) Le design thinking par la pratique, de la rencontre avec l'utilisateur à la commercialisation d'un produit innovant pour les seniors. Eyrolles, ISBN: 978-2-212-14385-0.
- Maurice, P., Padois, P., Measson, Y., Bidaud, P. (2017). Human-oriented design of collaborative robots. International journal of industrial ergonomics, Elsevier, 57, pp.88-102. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01428778>
- Mavridis N. (2014). A Review of Verbal and Non-Verbal Human-Robot Interactive Communication. Interactive Robots and Media Lab, NCSR Demokritos GR-15310, Agia Paraskevi, Athens, Greece.
- Millot, P. (1988). Supervision des procédés automatisés et ergonomie, Éditions Hermes, Paris.

- Millot P., Roussillon E. (1991). Man-Machine Cooperation in Telerobotics : Problematics and Methodologies. Second France Israël Symposium on Robotics, Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires, Gif sur Yvette, Avril.
- Miyachi, T., Iga, S., Furuhashi, T. (2017). Human Robot Communication with Facilitators for Care Robot Innovation. Actes de International Conference on Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems, KES2017, 6-8 September 2017, Marseille, France.
- Moulières-Seban, T. (2017). Conception de systèmes cobotiques industriels : approche cognitive : application à la production pyrotechnique au sein d'Ariane Group. Université de Bordeaux. Français. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01697610>
- Norman, D. et Draper, S. (1986). User Centered System Design; New Perspectives on Human-Computer Interaction. Erlbaum Associates Inc. Hillsdale, NJ, USA ©1986. ISBN:0898597811.
- Pacaux-Lemoine, 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. Proceedings of the 18th IFAC World Congress, Milano (Italy) August 28 - September 2, 2011, pp 6484–6492.
- Pacaux-Lemoine, M-P. et Vanderhaegen, V. (2013). Towards levels of cooperation. Proceedings IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2013, pp 291–296. <https://doi.org/10.1109/SMC.2013.56>
- 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: A Publication of the IEEE Systems, Man and Cybernetics Society, 30(3), pp 286–297.
- Pavard, B. (dir). (1994). Systèmes coopératifs : de la modélisation à la conception. Toulouse, Octarès Éditions, 1994. ISBN 2-906769-18-5.
- Patle, B-K. and al. (2019). A review: On path planning strategies for navigation of mobile robot, Defence Technology, <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.04.011>.
- Piçarraa, N., Gigerab, J-C. (2018). Predicting intention to work with social robots at anticipation stage: Assessing the role of behavioral desire and anticipated emotions. Computers in Human Behavior : Volume 86, September 2018, Pages 129-146 <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.04.026>.
- Quenehen, A., Pocachard, J., Klement, N. (2019). "Process optimisation using collaborative robots - comparative case study", IFAC-PapersOnLine, Volume 52, Issue 13, Pages 60-65, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.131>

- Quiguer, S. (2013). Acceptabilité, acceptation et appropriation des systèmes de transport intelligents : élaboration d'un canevas de co-conception multidimensionnelle orientée par l'activité. Psychologie. Phd thesis, University of Rennes 2, French. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00790392>
- Rasmussen, J. (1987). Information Processing and Human-Machine Interaction. An Approach to Cognitive Engineering. North-Holland Series in System Science and Engineering, 12.
- Riahi, M. (2004). Contribution à l'élaboration d'une méthodologie de spécification, de vérification et de génération semi-automatique d'interfaces homme-machine : application à l'outil ergo-conceptor+. Informatique. Phd thesis, University of valenciennes and Hainaut-Cambrésis, French. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01920101>
- Safeea, M., Neto N., and Bearee R, (2019). Efficient Calculation of Minimum Distance Between Capsules and Its Use in Robotics. IEEE Access, vol. 7, pp. 5368–5373, 2019.
- Safeea. M. (2020). Safe Collaborative Robotic Manipulators. Mechanical engineering [physics.class-ph]. HESAM Université ; Universidade de Coimbra, 2020. English. (NNT : 2020HESAE036). (tel-03070309)
- Sagot, J.C., Gomes, S. (2003). Intégration des facteurs humains dans la demarche de conception : une approche ergonomique. Cahier des notes documentaires Hygiène et Sécurité du travail. 191 – 2ieme Trimestre, p 61-71.
- Sagot, J.C., Mahdjoub, M., Gomes, S. (2005). Concevoir la fonction d'usage à travers l'ergonomie. Actes du Colloque : « Le design en question(s) », Centre Pompidou, 2005.
- Saraceno, M. (2020). Human “at the heart”. From robot to cobot, the myth of the “good automate” in Industry of the Futur mediatization (1978-2018). Communications, 37(1). <https://doi.org/10.4000/communication.11293>
- Sheridan, TB. (2002). Humans and automation: system design and research issues. Human Factors & Ergonomics Society & Wiley, New York.
- Subrin K., Muller, T., Ojeda, I.D.J.G., Garnier, S., Meriau, B0, Furet, B. (2019). Cobotisation d'opérations de polissage de pièces composites de grandes dimensions. 16ème édition Smart colloque (AIP-Primeca), Les Karellis-France, 2019.
- Terveen, L-G. (1995). Overview of human-computer collaboration, Knowledge-Based Systems, Volume 8, Issues 2–3, 1995, Pages 67-81, ISSN 0950-7051, [https://doi.org/10.1016/0950-7051\(95\)98369-H](https://doi.org/10.1016/0950-7051(95)98369-H).
- The bootcamp bootleg (2013). <http://dschool.stanford.edu/use-our-methods/>. Accessed may, 07 2021.

- Theurel J, Atain-Kouadio J-J, Desbrosses K, Kerangueven L, Duva C. (2018). 10 idées reçues sur les exosquelettes, (INRS).
- Theureau J, Pinsky P (1984) Paradoxe de l'ergonomie de conception et logiciel informatique. *Revue des conditions de travail* 9, pp 25–31.
- Vicentini F. (2020). Collaborative robotics: a survey. *Journal of Mechanical Design*. doi:10.1115/1.4046238.
- Wallén, J. (2008). *The History of the Industrial Robot*. Linköping University Electronic Press, 2008.
- Wang, J., Senecal, S. (2007). Measuring perceived website usability. *Journal of internet commerce*, 6(4), pp 97–112.
- Weistroffer, V., Paljic, A., Fuchs, P., Hugues, O., Chodacki, J-P., Ligot, P., Moarais, A. (2014). Assessing the acceptability of human-robot co-presence on assembly lines: a comparison between actual situations and their virtual reality counterparts. 23rd IEEE international symposium on robot and human interactive communication (roman), Aug 2014, Edinburgh, United Kingdom. <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01079580>
- Westerlund, L. (2000). *The Extended Arm of Man. A History of the Industrial Robot*. Informations förlaget, Stockholm 2000
- Wever R, Van Kuijk J and Casper B (2008) User-centred design for sustainable behavior. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1:1, pp 9–20, DOI: 10.1080/19397030802166205
- Wioland L, Debay L, Atain-Kouadio JJ (2019) Acceptation des exosquelettes par les opérateurs : étude exploratoire, Men at work department, INRS, March 2019, *References in Work Health* No. 157.
- Woods, D. (2005). Generic Support Requirements for Cognitive Work: Laws that Govern Cognitive Work in Action. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 49(3), 317–321. <https://doi.org/10.1177/154193120504900322>

Contribution à la prise en compte des dimensions humaines lors des projets de transformation industrielle - Cas de la cobotique

Résumé

La robotique industrielle a connu des évolutions importantes. Récemment, une nouvelle génération de robots dits « collaboratifs » ou « cobots » fonctionnant sans barrières physiques a vu le jour. Ces robots offrent de nouvelles opportunités d'application et d'usage, où humains et robots partagent le même espace de travail.

Ces nouvelles perspectives suscitent des débats portant sur la sécurité des futurs utilisateurs, l'impact de ces cobots sur la performance, la qualité et les conditions de travail des opérateurs humains. Elles ont renforcé le besoin d'une conception qui ne se concentre pas seulement sur l'élément technologique, mais aussi sur son utilisation potentielle, ses futurs utilisateurs et les caractéristiques de leur travail actuel.

Pour contribuer à ce débat, nous avons développé dans le cadre de cette thèse de doctorat des propositions méthodologiques d'aide à la conception des systèmes cobotiques. Elles visent à orienter vers une conception prenant en compte les facteurs humains et l'aspect multi-enjeux lié à la robotique collaborative.

Mots clés : Robotique collaborative ; Cobotique ; Ergonomie ; Conception centrée utilisateur

Résumé en anglais

Industrial robotics has undergone important evolutions. Recently, a new generation of so-called "collaborative" robots or "cobots" operating without physical barriers has emerged. These robots offer new applications and usage opportunities, where humans and robots share the same workspace.

These new possibilities are giving rise to debates about the safety of future users, the impact of these cobots on the performance, quality and working conditions of human operators. They have increased the need for a design that focuses not only on the technological aspect, but also on its potential use, its future users and the characteristics of their current work.

To contribute to this debate, we have developed in this thesis a set of methodological proposals to assist cobotic systems design. They aim at guiding towards a design that considers human factors and the multi-stakeholder aspect of collaborative robotics.

Keywords: Collaborative robotics; Cobotics; Ergonomics; User-centered design