



HAL
open science

Intérêt de la prise en compte des variabilités de l'activité et de l'acceptabilité dans le cadre d'une conception centrée utilisateurs des situations de travail collaboratives Humain-Robot

Etienne Fournier

► To cite this version:

Etienne Fournier. Intérêt de la prise en compte des variabilités de l'activité et de l'acceptabilité dans le cadre d'une conception centrée utilisateurs des situations de travail collaboratives Humain-Robot. Psychologie. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2024. Français. NNT : 2024GRALH011 . tel-04730140

HAL Id: tel-04730140

<https://theses.hal.science/tel-04730140v1>

Submitted on 10 Oct 2024

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Psychologie du Travail et Ergonomie**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par **Étienne FOURNIER-AUBRET**

Thèse dirigée par

Christine JEOFFRION, Professeure des universités, Université Grenoble Alpes

et co-encadrée par

Aurélié LANDRY, Maître de Conférences, Université Grenoble Alpes

préparée au sein du **Laboratoire Inter-universitaire de Psychologie : Personnalité, Cognition et Changement Social** dans l'École Doctorale **Sciences de l'Homme et de la Société**

Intérêt de la prise en compte des variabilités de l'activité et de l'acceptabilité dans le cadre d'une conception centrée utilisateurs des situations de travail collaboratives Humain-Robot

Thèse soutenue publiquement le **8 juillet 2024**,
devant le jury composé de :

Monsieur Marc-Éric BOBILLIER CHAUMON

Professeur des Universités, CNAM Paris, rapporteur et président

Madame Émilie LOUP-ESCANDE

Professeure des Universités, Université de Picardie Jules Verne, rapporteure

Madame Céline BAEYENS

Professeure des Universités, Université Grenoble Alpes, examinatrice

Monsieur David DANÉY

Chercheur senior HDR, INRIA Bordeaux, examinateur

Madame Christine JEOFFRION

Professeure des Universités, Université Grenoble Alpes, directrice

Madame Aurélié LANDRY

Maître de Conférences, Université Grenoble Alpes, co-encadrante



« Il n'y a pas de lendemains qui chantent. Il n'y a que des aujourd'hui qui bruissent. »

Alain Damasio, Les Furtifs (2019)

Remerciements

Étonnamment, les trois dernières années ont été parmi les plus heureuses que j'ai vécues. En effet, j'ai réalisé un travail qui me passionne et auquel j'attribue beaucoup de sens sans que celui-ci ne m'empêche de vivre une vie riche et épanouie. J'ai conscience que cela n'a été possible qu'avec le soutien de mes collègues et de mes proches. Je leur adresse alors ces remerciements.

Je souhaite remercier tous les membres du jury pour le temps qu'ils ont accepté d'allouer à la relecture de cette thèse. Merci à Émilie Loup-Escande et à Marc-Éric Bobillier Chaumon d'en être les rapporteurs, et merci à Céline Baeyens et à David Daney d'en être les examinateurs. Vos retours sont précieux et m'aideront à m'améliorer pour la suite de ma carrière.

J'aimerais à présent remercier mes deux encadrantes de thèse pour ces belles années de recherche. Christine, tu m'as apporté ton soutien, tes nombreux conseils et tu m'as ouvert des portes qui m'ont permis de faire de belles rencontres scientifiques. Tu as passé un temps considérable à corriger moult fautes d'orthographe et de grammaire, tout en restant à l'écoute et disponible quand j'en avais besoin. Je t'en remercie sincèrement. Aurélie, tu as jonglé, non sans une grande dextérité, avec de multiples casquettes pour m'encadrer au mieux : tantôt encadrante scientifique, tantôt collègue aidante, tantôt soutien moral et psychologique. Je t'en suis extrêmement reconnaissant. Il est clair pour moi que cette thèse est notre travail à tous les trois, et je n'aurais pas pu rêver avoir de meilleures encadrantes que vous deux. Merci pour tout...

Je remercie également le laboratoire qui nous a ouvert ses portes pour notre étude de terrain, ainsi que tous les participants qui ont accepté de participer à toutes nos études expérimentales. C'est grâce à vous que cette thèse a pu être rédigée.

Je veux remercier mes collègues qui m'ont fait grandir professionnellement et personnellement. Tout d'abord, merci à tous les collègues du LIP/PC2S, à nos très performantes gestionnaires (Anne et Géraldine) et à ses doctorants et post-doc (et anciens) qui étaient présents au quotidien (Agata, Anthony, Aurore, Camille, Carla, Cédric, Evane, Ivane, Kévin, Maddy, Maria, Marine, Maude, Mona, Noémie, Olivier, Ronan, les deux Yoann et les deux Zoé). J'espère que le comité des fêtes aura une longue et prospère existence ! J'adresse des pensées toutes particulières à mes collègues (et anciens) de l'équipe RAC : Anna, Caroline, Cézanne, Emma, Gérard, Laetitia, Lucie, Maria, Mohamed, Murielle, Nassima, Nathan, Rémi, Tiffany et à notre bien-aimée Yuna. Merci pour votre soutien et pour nos échanges enrichissants. Merci à

Emma pour nos intenses journées de modélisation et nos nombreux afterworks pour s'en remettre... Merci également à tous mes collègues du projet ANR PACBOT, c'est aussi grâce à nos rencontres que s'est construite la thèse. Je remercie également mes collègues de l'équipe MARVIN du LIG pour votre accueil, votre soutien et votre aide durant les expérimentations. C'est toujours un plaisir de travailler avec vous. Merci également à toutes les membres du RJCE, vous m'avez aidé à m'ouvrir sur l'extérieur et à rencontrer beaucoup de chercheurs très inspirants. De même, j'adresse mes remerciements à l'équipe AUCTUS de l'Inria de Bordeaux de m'avoir ouvert ses portes à la fin de ma thèse et de m'avoir accueilli aussi chaleureusement.

Je tiens également à remercier tous les collègues qui m'ont permis de progresser au fur et à mesure des différents séminaires de recherche (e.g. ESTO, PACBOT, RAC, TEA) et colloques/congrès (e.g. AIPTLF, Jeunes Chercheurs, SELF, EAWOP) auxquels j'ai participé. Nos échanges ont largement contribué à l'évolution de cette thèse.

Je pense à présent à ma famille, peu nombreuse mais soudée, qui m'a soutenu au quotidien et qui a pavé le chemin qui me mène aujourd'hui à écrire cette thèse. Mes pensées virevoltent régulièrement en Auvergne où je sais que je serai accueilli et compris dès que j'en ressens le besoin. Je vous aime de tout mon cœur. J'en profite pour remercier mes amis de part et d'autre du monde, et notamment les « compagnons », qui ont toujours été présents depuis plus de 15 ans. Vous m'avez aidé à redevenir un enfant malgré la pression sociale de devoir être un adulte. J'ai énormément de chance de vous avoir... Merci également à tous mes « collègues d'association » qui m'ont toujours soutenu à travers ces trois ans.

Et pour finir, merci à Déborah. Ma source d'inspiration, mon pilier et ma lumière. Tu as été le soutien le plus précieux à travers toutes ces années et je suis incroyablement heureux (et toujours stupéfait) que tu m'aies choisi comme mari. Merci d'exister. Je t'aime.

Résumé

La Commission Européenne encourage l'utilisation de robots collaboratifs (cobots) pour assister l'humain dans son travail. Cependant, les cobots semblent avoir des difficultés à transformer favorablement les situations de travail lorsqu'ils ne prennent pas en compte les variabilités des situations. Cette thèse s'est donc donnée comme objectifs de caractériser les variabilités dans le cadre d'une l'implémentation cobotique et de guider une démarche de conception centrée sur les futurs utilisateurs en mobilisant les approches d'acceptabilité, d'acceptation et d'expérience utilisateur. Une analyse de l'activité a été conduite dans un laboratoire de chimie dans le cadre d'une future implémentation cobotique. 11 opérateurs ont été observés durant leur activité et 34 ont participé à des entretiens semi-directifs. Les résultats ont permis d'identifier que l'activité en boîte à gants était le poste de travail qui bénéficierait le plus d'une collaboration cobotique. De même, ils ont montré une invisibilisation de certaines activités due à un écart entre le travail prescrit et l'activité d'où résultent des expositions aux risques régulières qui pourraient être évitées via une implémentation cobotique. Nous avons ainsi identifié plusieurs variabilités ayant des effets sur l'activité des opérateurs. Celles-ci ont servi à élaborer des paradigmes expérimentaux afin de tester l'effet d'une collaboration cobotique. Trois Tests Utilisateurs ont été réalisés avec au total 212 participants qui devaient réaliser des tâches d'assemblage de type industriel où une ou plusieurs variabilités étaient prises en charge dès la conception cobotique. La tâche était réalisée ou bien seul, ou bien en binôme avec un autre humain ou avec un cobot (YuMi d'ABB). Différents types de mesure ont été effectués : la charge de travail (évaluée via la NASA-TLX, Hart, 2006 ; Hart & Staveland, 1988), le nombre d'erreurs, le nombre de gestes, le temps de réalisation, le degré d'acceptabilité de la collaboration cobotique (évalué via le TAM, Venkatesh et al., 2012) et l'exposition aux risques simulée. La collaboration cobotique a diminué les effets négatifs de plusieurs variabilités (e.g. variabilité du niveau de difficulté, variabilité de l'expertise de l'opérateur) sur la charge mentale de l'opérateur et sur le succès à la tâche. Les participants ont eu un meilleur taux de succès à la tâche lorsqu'ils collaboraient avec un cobot, même s'ils mettaient par ailleurs plus de temps à réaliser la tâche. De plus, les participants ont déclaré avoir plaisir à collaborer avec un cobot et avoir confiance en les informations qu'il fournissait (mesurés via une échelle d'items issus de l'étude de Martin, 2018). Enfin, quand le cobot s'adaptait aux contraintes de sécurité de l'humain, ce dernier s'exposait à moins de risques. D'un point de vue théorique, ces études empiriques ont permis de proposer un cadre intégrant les modèles de variabilités au travail et d'apporter des précisions sur les effets de la collaboration cobotique sur l'humain et

sa tâche. D'un point de vue pratique, ces différentes études nous ont permis de proposer une grille de repérage des variabilités et de formuler des recommandations visant à accompagner l'implémentation d'une collaboration cobotique.

Mots clés : Variabilités, Cobot, Conception Centrée Utilisateur (CCU), Acceptabilité, Activité de chimiste

Abstract

The European Commission is encouraging the use of collaborative robots (cobots) to assist humans in their work. However, cobots seem to have difficulty in favorably transforming work situations when they do not consider the variabilities of the situations. The aim of this thesis was therefore to characterize variability in the context of a cobotic implementation, and to guide a design approach focused on future users, using acceptability, acceptance and user experience approaches. An activity analysis was carried out in a chemical laboratory as part of a future cobotic implementation. 11 operators were observed during their activity and 34 took part in semi-directive interviews. The results identified glovebox activity as the workstation that would benefit most from cobotic collaboration. They also showed that certain activities were rendered invisible due to a discrepancy between prescribed work and actual activity, resulting in regular exposure to risks that could be avoided through cobotic implementation. We have thus identified several variabilities with effects on operator activity. These were used to design experimental paradigms to test the effect of cobotic collaboration. Three User Tests were carried out with a total of 212 participants, who were asked to perform industrial assembly tasks where one or more variabilities were considered in the cobotic design. The task was performed either alone, or in pairs with another human or with a cobot (ABB's YuMi). Different types of measurement were carried out: workload (assessed via NASA TLX, Hart, 2006; Hart & Staveland, 1988), number of errors, number of gestures, completion time, degree of acceptability of cobotic collaboration (assessed via TAM, Venkatesh et al., 2012) and simulated risk exposure. Cobotic collaboration reduced the negative effects of several variabilities (e.g. variability in difficulty level, variability in operator expertise) on operator mental load and task success. Participants had a higher task success rate when collaborating with a cobot, even though they otherwise took longer to complete the task. In addition, participants reported enjoying collaborating with a cobot and having confidence in the information it provided (measured via a scale of items from Martin, 2018). Finally, when the cobot adapted to the

human's safety constraints, the latter exposed himself to fewer risks. From a theoretical point of view, these empirical studies made it possible to propose a framework integrating models of variability at work, and to shed light on the effects of cobotic collaboration on the human and his task. From a practical point of view, these different studies have enabled us to propose a grid for identifying variabilities and to formulate recommendations designed to support the implementation of cobotic collaboration.

Keywords: Variability, Cobot, User Centered Design (UCD), Acceptability, Chemist activity

Plan de la thèse

Remerciements	3
Résumé	5
Abstract	6
Plan de la thèse	8
Liste des abréviations et sigles dans l'ordre alphabétique	14
Listes des figures	16
Listes des tableaux	19
Introduction générale et design de la recherche	21
Cadre théorique	27
SECTION 1. INTRODUCTION AU CONTEXTE INDUSTRIEL ET À LA COBOTIQUE	28
Chapitre 1. Révolution industrielle.....	28
1.1. Industrie 4.0.....	28
1.2. Industrie 5.0.....	30
1.3. Synthèse du chapitre	33
Chapitre 2. Les technologies émergentes et leur prise en compte dans la recherche scientifique sur l'humain au travail	34
2.1. Définitions des technologies émergentes.....	34
2.2. Prise en compte des technologies émergentes en psychologie du travail et ergonomie	34
2.3. Synthèse du chapitre.....	41
Chapitre 3 : Les robots collaborateurs	42
3.1. Définition des cobots.....	42
3.2. État des lieux de l'implémentation des cobots	46
3.3. Effets de l'usage de la cobotique.....	47
3.4. Synthèse du chapitre.....	50
SECTION 2. ACCEPTABILITE ET ACCEPTATION SITUEE, QUELLES CONSEQUENCES DE L'IMPLEMENTATION TECHNOLOGIQUE ?	51
Chapitre 1. L'acceptabilité des technologies	51
1.1. Définition de l'acceptabilité	51
1.2. Le rôle des perceptions dans l'intention d'usage	51
1.3. Les modèles prédictifs du comportement d'utilisation	53
1.4. Les modèles de l'acceptabilité	56
1.5. Synthèse du chapitre.....	64

Chapitre 2 : L'expérience utilisateur (UX).....	65
2.1. Définition de l'expérience utilisateur.....	65
2.2. Modèles de l'expérience utilisateur.....	67
2.3. Tests Utilisateurs	70
2.4. Synthèse du chapitre.....	73
Chapitre 3 : L'acceptation située	75
3.1. Définition de l'acceptation située	76
3.2. Le modèle de l'acceptation située.....	76
3.3. Proposition d'articulation des différentes approches	77
3.4. Synthèse du chapitre	80
SECTION 3. LES VARIABILITES AU TRAVAIL	81
Chapitre 1. Modélisation des variabilités au travail	82
1.1. Définition des variabilités dans le cadre des modèles de l'activité	83
1.2. Synthèse du chapitre	87
Chapitre 2. Effets des variabilités sur l'opérateur et sur le travail dans le cadre des technologies robotiques	88
2.1. Variabilités individuelles	88
2.2. Variabilités de la tâche.....	92
2.3. Synthèse du chapitre	96
SECTION 4. TRAVAIL DE CHIMISTE EN RECHERCHE & DEVELOPPEMENT (R&D)	97
Chapitre 1 : Les chimistes en R&D, quelle activité ?.....	97
1.1. Définition de la chimie Recherche & Développement.....	97
1.2. Contenu du travail et équipements utilisés	98
1.3. Synthèse du chapitre	102
Chapitre 2 : L'activité de chimiste en R&D, quels impacts sur les opérateurs et leur activité ?	103
2.1. Introduction des impacts sur les opérateurs et leur activité	103
2.2. Les impacts identifiés par la littérature scientifique des équipements utilisés par les opérateurs chimistes.....	103
2.3. Les impacts identifiés par la littérature scientifique du contrôle attentionnel constant sur les opérateurs et leur activité	104
2.4. Les impacts identifiés par la littérature scientifique des locaux sur les opérateurs et leur activité.....	105
2.5. Les impacts identifiés par la littérature scientifique de la gestion du risque sur les opérateurs et leur activité	105

2.5. L'activité de chimiste de R&D en chimie, possibilité d'une aide technologique ?	106
2.6. Synthèse du chapitre	109
Questions de recherche, hypothèses et méthode	110
QUESTIONS DE RECHERCHE	111
HYPOTHESES GENERALES DE LA THESE	113
MÉTHODE : UNE DEMARCHE DE CONCEPTION CENTRÉE-UTILISATEUR (CCU)	113
Partie empirique	116
ÉTUDE 1 : ANALYSE DU CONTEXTE D'USAGE, DES CARACTERISTIQUES DES UTILISATEURS ET DES BESOINS	117
Chapitre 1. Analyse de la demande	117
1.1. Demande liée à l'implémentation cobotique	117
1.2. Demandes non liées à l'implémentation cobotique	118
1.3. Reformulation des deux demandes	121
1.4. Comité de pilotage et plan d'action	121
Chapitre 2. Analyse de l'activité via l'observation des postes de travail	124
2.1. Participants	124
2.2. Méthode	125
2.3. Résultats : Process du travail d'un chimiste en R&D	128
Chapitre 3. Analyse de l'activité via les entretiens	150
3.1. Procédure de recrutement et participants	150
3.2. Déroulement et guide des entretiens	153
3.3. Procédure d'analyse des données recueillies	154
3.4. Présentation de l'analyse de contenu des entretiens	155
3.5. Variabilités identifiées dans l'activité de chimiste	164
3.6. Restitution de l'analyse et des entretiens au comité de pilotage	166
3.7. Synthèse du chapitre	167
ÉTUDE 2 : PREMIER TEST UTILISATEUR : TEST DES EFFETS DE L'ASSISTANCE COBOTIQUE SUR LA PERFORMANCE ET LA CHARGE MENTALE D'UNE TACHE D'ASSEMBLAGE	168
Chapitre 1. Présentation de l'étude et méthode utilisée	168
1.1. Objectifs et hypothèses	168
1.2. Procédure et participants	168
1.3. Protocole expérimentale	169
1.4. Outils utilisés	172

Chapitre 2. Résultats du premier TU : test des effets de l'assistance cobotique sur la performance et la charge mentale d'une tâche d'assemblage.....	175
2.1. Effet de la collaboration sur la charge de travail perçue (H1)	175
2.2. Effet de la collaboration sur le temps de réalisation (H2)	176
2.3. Effet de la collaboration sur le nombre d'erreurs (H3).....	177
2.4. Effet de la collaboration sur le nombre de gestes (H4).....	178
3. Synthèse du premier TU	180
ÉTUDE 3 : DEUXIÈME TEST UTILISATEUR : TESTS DE LA PRISE EN COMPTE DANS L'ASSISTANCE COBOTIQUE DE LA COMPLEXITE DE LA TACHE ET DE LA MAIN DOMINANTE.....	
Chapitre 1. Présentation de l'étude et méthode utilisée.....	181
1.1. Objectifs et hypothèses	181
1.2. Procédure expérimentale.....	183
Chapitre 2. Résultats du deuxième TU : tests de la prise en compte dans l'assistance cobotique de la complexité de la tâche et de la main dominante	185
2.1. L'effet de la complexité de la tâche (H1)	186
2.2. L'effet de l'adaptation du cobot au type de main dominante (H2).....	191
2.3. Effet de la collaboration sur la charge de travail, le taux de succès, le nombre d'erreurs, le temps de réalisation et le nombre de gestes (H3)	191
3. Synthèse du deuxième TU	194
ÉTUDE 4 : TROISIÈME TEST UTILISATEUR : TESTS DE LA PRISE EN COMPTE DE LA DANGEROUSITE DES PIECES ET DE LA PRISE EN COMPTE DE L'EXPERTISE DANS L'ASSISTANCE COBOTIQUE.....	
Chapitre 1. Présentation de l'étude et de la méthode utilisée.....	195
1.1. Objectifs et hypothèses	195
1.2. Participants.....	196
1.3. Protocole expérimental	196
Chapitre 2. Résultats du troisième TU : effets de la prise en compte de la dangerosité des pièces et de la prise en compte de l'expertise dans l'assistance cobotique	201
2.1. Effet du niveau d'expertise de l'opérateur dans le cadre d'une collaboration cobotique.....	201
2.2. Effet du degré d'adaptation du cobot dans le cadre d'une collaboration cobotique	205
3. Synthèse du troisième TU.....	210
ÉTUDES 3 ET 4 : TESTS DE L'ACCEPTABILITÉ COBOTIQUE DANS UNE SITUATION DE TRAVAIL COLLABORATIF	
Chapitre 1. Méthode de mesure de l'acceptabilité cobotique.....	211
Chapitre 2. Résultats de l'étude de l'acceptabilité cobotique.....	213

2.1. Test de l'acceptabilité selon le type de collaboration et la main dominante (deuxième TU).....	213
2.2. Test de l'acceptabilité cobotique selon l'expertise de la tâche et l'adaptation cobotique (troisième TU).....	216
3. Synthèse des résultats sur l'acceptabilité.....	220
ÉTUDES 2, 3 ET 4 : PROFIL DES UTILISATEURS	221
1. « Faire contre » ou « faire avec »	221
2. Anthropomorphisme et confiance dans l'autorité cobotique.....	222
3. Évolution de la collaboration au cours de l'usage	223
Discussion	224
1. Identification des variabilités et de leurs impacts sur l'opérateur et la performance	225
2. Prise en charge des variabilités par l'assistance cobotique et effets sur la performance et la santé	228
3. L'acceptabilité de la cobotique.....	231
4. Discussion générale	233
5. Présentation des limites de la thèse	235
Recommandations générales	238
1. Recommandations pour les laboratoires en chimie R&D.....	239
2. Recommandations pour l'identification des variabilités	239
3. Recommandations pour l'implémentation cobotique	240
Perspectives de recherche	243
Conclusion générale	248
Bibliographie	250
Annexes	276
Annexe 1. CV	277
Annexe 2. Présentation aux managers de la démarche d'intervention	280
Annexe 3. Présentation de l'étude sur le terrain aux opérateurs	281
Annexe 4. Diaporama de restitution au comité de pilotage.....	282
Annexe 5. Présentation de l'expérience	291
Annexe 6. Formulaire de consentement	292
Annexe 7. Tableau MANOVA Vi « expertise » 3èmeTUs (SPSS)	294
Annexe 8. Tableau MANOVA Vi « adaptation » 3èmeTUs (SPSS)	295
Annexe 9. Alphas de Cronbach du questionnaire d'acceptabilité du 2 ^{ème} TU	296
Annexe 10. Analyse factorielle du questionnaire d'acceptabilité du 2 ^{ème} TU.....	298
Annexe 11. Tableau MANOVA Vd « acceptabilité » 3èmeTUs (SPSS).....	299
Annexe 12. État des connaissances de l'effet de la collaboration cobotique sur les variabilités (vert) et les recherches à effectuer (rouge)	300

AVANT-PROPOS

Cette thèse a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche et a donné lieu à des publications, communications et actions de vulgarisation qui sont présentées en fin de manuscrit (Cf. Annexe 1).

Liste des abréviations et sigles dans l'ordre alphabétique

ABB = ASEA Brown Boveri

ANOVA = Analyse de Variance

ANR = Agence Nationale de la Recherche

BAG = Boîte à gants

CCU = Conception Centrée Utilisateurs

CMR = Cancérogènes, Mutagènes et Reprotoxiques

Cobots = robots collaboratifs

CSE = Comité Social et Économique

CUE-model = Modèle des Composants de l'Expérience Utilisateur

Df = Degrés de Liberté

DU = Document Unique

ECS = situation de collaboration

EPI = Équipement de Protection Individuelle

ET = Écart-type

GUI = Interface Utilisateur Graphique

H = Hypothèse

H/C = Humain/Cobot

H/H = Humain/Humain

HSE = Hygiène, Sécurité et Environnement

IA = Intelligence Artificielle

IMS = Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système

ISO = International Standard Organization

Inria = Institut National de Recherche en sciences et technologies du numérique

KMO = Kaiser-Meyer-Olkin

LIG = Laboratoire d'Informatique de Grenoble

LIP/PC2S = Laboratoire Interuniversitaire de Psychologie, Personnalité, Cognition, Changement Social

MANOVA = Multi Analyse de Variance

NASA-TLX =

OSF = Open Science Framework

PACBOT = Planification des Actions d'un CoBOT adaptées aux variabilités humaines

PDDL = Planning Domain Description Language

R&D = Recherche & Développement

RH = Ressources Humaines

SHS = Sciences Humaines et Sociales

Sig. = Significativité

SWOT = forces, risques, opportunités et menaces

TAM = Modèle de l'Acceptation des Technologies

TAR = Théorie de l'Action Raisonnée

TCP = Théorie du Comportement Planifié

TMS = Troubles MusculoSquelettiques

TU = Test Utilisateur

UTAUT = Théorie Unifiée de l'Acceptation des Technologies

UX = eXpérience Utilisateur

WP = Work Package

YOLO = You Only Look Once

YuMi = You and Me

Listes des figures

Figure 1. Objectifs de la thèse répondant aux besoins du projet ANR et au terrain d'étude...	25
Figure 2. Illustration de la différence entre un robot et un cobot industriel avec leurs caractéristiques associées (inspiré de Knudsen et Kaivo-Oja, 2020).....	43
Figure 3. Nombre de publications via le Web of Science utilisant le terme “cobot” ou “cobot collaboration” dans leur titre.....	44
Figure 4. Modèle des dimensions de l'attitude inspiré par Hellriegel et Slocum (2006).....	53
Figure 5. Modèle issu de la Théorie de l'Action Raisonnée de Fishbein et Ajzen (1975).....	54
Figure 6. Modèle issu de la Théorie du Comportement Planifié de Ajzen (1991).....	55
Figure 7. TAM adaptée de Davis et al. (1989).....	57
Figure 8. Modèle de l'utilisation de PC (Thompson et al., 1991).....	58
Figure 9. Modèle de l'UTAUT (Venkatesh et al., 2003).....	60
Figure 10. Coefficients bêta moyens des variables issus de la méta-analyse sur l'UTAUT (Dwivedi et al., 2011).....	62
Figure 11. UTAUT2 (Venkatesh et al., 2012).....	63
Figure 12. Modèle de l'UX de Hassenzahl (2003).....	67
Figure 13. Modèle des Composants de l'Expérience Utilisateur (CUE-model) de Mahlke et Thuring (2007).....	69
Figure 14. Synthèse des principales dimensions liées à l'acceptation située (Bobillier Chaumon, 2013, p. 156).....	77
Figure 15. Proposition d'articulation entre les différentes approches (Bobillier Chaumon, 2016).....	78
Figure 16. Illustration extraite du roman de Lewis Carroll (1871) représentant Alice et la Reine Rouge courant avec le paysage.....	81
Figure 17. Nombre de mentions du terme « variabilité » dans les titres des publications issues de la base de données Web of Science de 1985 à 2020.....	82
Figure 18. Les variabilités et leurs facteurs selon Quéinnec et al. (1991).....	85
Figure 19. Les variabilités dans l'activité selon Guérin et al., 2006.....	86
Figure 20. Illustration de tous les types de variabilités recensées dans la littérature liées aux interactions humain/cobot au travail.....	96
Figure 21. Les différents éléments de la BAG : (1) coque de protection, (2) espace d'entrée / sortie, (3) emplacements des gants, (4) équipement de surveillance de l'environnement, (5)	

fenêtre et (6) étagères (Tokatli et al., 2021).....	98
Figure 22. Exemple d'organisation d'un laboratoire de chimie (Triolet et al., 2002, p. 13)..	100
Figure 23. Méthode de CCU utilisée dans la thèse.....	115
Figure 24. Plan d'action présenté au début du projet.....	123
Figure 25. Techniques d'analyse de l'activité mobilisées dans l'étude.....	127
Figure 26. Process du travail d'un chimiste en R&D.....	130
Figure 27. Process prescrit fourni par les managers des opérateurs en BAG.....	134
Figure 28. Process réel d'un poste de travail en BAG.....	136
Figure 29. Chronique d'activité d'une activité en BAG réalisé par un opérateur expert....	138
Figure 30. Évolution du niveau de d'exposition aux risques selon la temporalité du projet et la décision de l'opérateur inspiré de Girard (à paraître).....	144
Figure 31. Prise de risque de l'opérateur en fonction de variabilités internes et externes de la situation de travail (traits bleus = possibilités, traits rouges = cas observé).....	146
Figure 32. Répartition des opérateurs interrogés selon leur statut au sein du terrain d'étude.....	153
Figure 33. Présentation des trois modèles à répliquer par le participant.....	169
Figure 34. Localisation du stock du participant (1), de la zone de construction (2), et du stock du cobot (3).....	170
Figure 35. Le robot YuMi (ABB) utilisé dans l'expérience.....	172
Figure 36. Diagramme en boîte des valeurs de charge de travail en condition contrôle (bleu) et en condition expérimentale (orange).....	176
Figure 37. Diagramme en boîte du temps de réalisation en condition contrôle (bleu) et en condition expérimentale (orange).....	177
Figure 38. Diagramme en boîte du nombre d'erreurs en condition contrôle (bleu) et en condition expérimentale (orange).....	178
Figure 39. Diagramme en boîte du nombre de gestes en condition contrôle (bleu) et en condition expérimentale (orange).....	179
Figure 40. Illustration de la procédure expérimentale.....	183
Figure 41. Un participant réalisant la tâche avec YuMi.....	184
Figure 42. Deux participants réalisant la tâche (condition H/H).....	184
Figure 43. Diagramme à barres de la charge de travail, réussite, erreurs, temps de réalisation et gestes dans les tâches simples et complexes au cours de la collaboration H/H et H/C...	187

Figure 44. Effet d'interaction du type de collaboration et de la complexité de la tâche sur la charge de travail.....	188
Figure 45. Effet d'interaction du type de collaboration et de la complexité de la tâche sur le pourcentage de réussite.....	189
Figure 46. Effet d'interaction du type de collaboration sur l'effet de la complexité de la tâche sur le temps de réalisation.....	190
Figure 47. Effet d'interaction du type de collaboration et de la complexité de la tâche sur le nombre de gestes.....	191
Figure 48. Diagramme à barres de la charge de travail, de la réussite, des erreurs et du temps de réalisation en collaboration avec un cobot et avec un autre humain.....	192
Figure 49. Présentation des différentes variables utilisées dans l'expérience.....	197
Figure 50. Protocole expérimental (tâche E : entraînement ; tâche C : complexe).....	198
Figure 51. Le modèle simple (à gauche) et le modèle complexe (à droite) utilisés dans l'expérience.....	199
Figure 52. Positionnement du matériel en condition de tâche complexe (1 : zone de travail ; 2 : stock de l'humain ; 3 : stock du cobot).....	200
Figure 53. Diagramme en boîte du nombre d'erreurs des experts (bleu) et des non-experts (orange).....	203
Figure 54. Diagramme en boîte du nombre d'exposition aux pièces dangereuses des experts (bleu) et des non-experts (orange).....	204
Figure 55. Diagramme en boîte du niveau d'exposition aux risques des experts (bleu) et des non-experts (orange).....	205
Figure 56. Diagramme en boîte de l'exposition aux risques quand le cobot s'adapte (bleu) et quand il ne s'adapte pas (orange).....	208
Figure 57. Diagramme en boîte du niveau d'exposition aux risques quand le cobot s'adapte (bleu) et quand il ne s'adapte pas (orange).....	209
Figure 58. Diagramme à barres des sous-dimensions de l'échelle d'acceptabilité.....	215

Listes des tableaux

Tableau 1. Critères de l'ECS, dimensions et critères pragmatiques associés (Compan, 2022, p. 72-73).....	38
Tableau 2. Personnels rencontrés, nombre et durée des entretiens lors de l'analyse de la demande.....	119
Tableau 3. Caractéristiques des participants observés pour l'analyse de poste.....	125
Tableau 4. Présentation des postes observés et du temps d'observation.....	126
Tableau 5. Catégorisation et occurrences des différents risques trouvés dans le DU 2022...	131
Tableau 6. Liste des risques liés à l'utilisation de la BAG et de la sorbonne.....	132
Tableau 7. Liste des variabilités identifiées sur le terrain, leurs effets et leur utilisation dans les TUs (en vert = déjà utilisées dans un TU).....	148
Tableau 8. Caractéristiques des participants interrogés.....	151
Tableau 9. Guide d'entretien utilisé sur le terrain.....	153
Tableau 10. Forces et faiblesses évoquées par les opérateurs, leurs nombres d'occurrences, leur explication et des verbatims.....	156
Tableau 11. Perception des opérateurs sur les caractéristiques de leur travail.....	160
Tableau 12. Liste des effets rapportés du travail sur les opérateurs chimistes.....	163
Tableau 13. Catégorisation des variabilités identifiées sur le terrain d'étude.....	164
Tableau 14. Illustration de la répartition des activités entre l'humain et le cobot dans la condition de collaboration.....	170
Tableau 15. Version française du questionnaire NASA-TLX utilisé dans l'expérience.....	174
Tableau 16. Résultats descriptifs de la première hypothèse.....	186
Tableau 17. Résultats descriptifs de la troisième hypothèse.....	191
Tableau 18. Résultats de la multi-analyse de variance du type de collaboration sur la charge de travail, la réussite, les erreurs, le temps et les gestes (en gras les effets significatifs).....	193
Tableau 19. Résultats descriptifs de l'effet de l'expertise sur les différentes dimensions....	202
Tableau 20. Résultat de la MANOVA réalisée avec l'expertise en variable indépendante (en gras les résultats significatifs).....	203
Tableau 21. Résultats descriptifs de l'effet de l'adaptation sur les différentes dimensions...	206
Tableau 22. Résultat de la MANOVA réalisée avec le niveau d'adaptation du cobot en variable indépendante.....	207
Tableau 23. Le questionnaire d'acceptabilité utilisé dans l'étude.....	212
Tableau 24. Résultats descriptifs du questionnaire d'acceptabilité du deuxième TU.....	214

Tableau 25. Résultats de la multi-analyse de variance du type de collaboration sur les différentes échelles du questionnaire d'acceptabilité (en gras les effets significatifs).....	216
Tableau 26. Résultats descriptifs de l'effet de l'expertise sur les différentes dimensions.....	217
Tableau 27. Effet de l'expertise du participant sur les scores d'acceptabilité.....	218
Tableau 28. Résultats descriptifs de l'effet de l'adaptation cobotique sur les différentes échelles du questionnaire d'acceptabilité.....	219
Tableau 29. Résultat de la MANOVA comparant les scores d'acceptabilité selon le niveau d'adaptation du cobot.....	220

Introduction générale et design de la recherche

Nous sommes entrés depuis les années 2020 dans l'industrie 5.0 (European Commission, 2021). Celle-ci vise à accompagner les acteurs de l'industrie dans leur croissance en utilisant plus de technologies émergentes collaboratives et en maintenant l'humain en centre des réflexions autour de l'organisation du travail. L'usine du futur a donc un enjeu important : la préservation de la santé et le confort des opérateurs tout en améliorant leur productivité (INRS, 2018). Pour atteindre cet objectif, la Commission Européenne a proposé plusieurs types de technologies émergentes telles que définies par Bobillier Chaumon (2021). L'une de ces technologies, les cobots (Peshkin & Colgate, 1999), suscite un intérêt grandissant parmi les chercheurs qui s'intéressent au travail industriel au sein de l'industrie 5.0.

Dans ce cadre, l'Agence Nationale de la Recherche a financé un nouveau projet : le projet ANR PACBOT (Planification des Actions d'un CoBOT adaptées aux variabilités humaines). Son objectif a été de favoriser l'introduction d'un cobot dans une situation de travail précise : un poste en Recherche et Développement dans un laboratoire de chimie¹. L'enjeu de ce projet a été d'utiliser la robotique collaborative pour assister l'humain au travail (opérateur), lui permettre de se focaliser sur les tâches dont il a l'expertise, et déléguer les charges et contraintes liées à un outil intelligent, cela dans l'objectif de permettre à l'opérateur de garder une grande liberté de mouvement et de décision, en préservant ses capacités. Le robot doit permettre une adaptabilité coordonnée en assistant cognitivement et physiquement l'opérateur. Il s'agit d'un projet de recherche collaborative avec une équipe multidisciplinaire comptant des psychologues du travail, des ergonomes, des informaticiens et des roboticiens, comme le préconise la commission européenne qui recommande ce type d'approches dès les premières étapes de la mise en œuvre de la technologie (European Commission, 2021). L'équipe est constituée de membres issus de l'Inria (Institut National de Recherche en sciences et technologies du numérique), de l'IMS (Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système), du LIP/PC2S (Laboratoire Interuniversitaire de Psychologie, Personnalité, Cognition, Changement Social) et du LIG (Laboratoire d'Informatique de Grenoble). Les compétences issues des différents champs de recherche sont en effet complémentaires et indispensables lors de la conception de robots intelligents. Les psychologues du travail et les ergonomes accompagnent l'adaptation du travail à l'humain et le maintien de la santé et de la performance

¹ <https://anr.fr/Projet-ANR-20-CE10-0005>

des opérateurs, et les chercheurs informaticiens programment des machines intelligentes pour aller dans ce sens. Dans cette collaboration, le but est que l'opérateur ne soit pas le seul à réguler son activité pour parvenir à son but, mais qu'il soit assisté dans cette régulation pour limiter le coût que celle-ci porte sur sa santé et sa performance. Dans le cadre de la cobotique, ce sont les machines qui s'adaptent à l'humain. L'idéal partagé par les différents chercheurs à l'origine du projet est donc d'adapter un cobot aux opérateurs (en l'occurrence, il s'agit ici de chimistes) qui puisse les soutenir en prenant en charge certaines variabilités de la situation de travail au sein d'un laboratoire en Recherche et Développement. Les retours du terrain concernant les implémentations cobotiques mettent en effet en lumière de nombreuses faiblesses issues de la collaboration humain/cobot (Compan, 2022 ; Schoose et al., 2023). Les cobots et les professionnels qui les implémentent ne prennent pas toujours en compte les variabilités présentes dans la situation de travail de l'opérateur. Les variabilités sont les changements dans la situation de travail qui vont pousser l'opérateur à réguler son activité pour maintenir sa performance (Brangier & Valléry, 2021 ; Guérin et al., 1997 ; Quéinnec et al., 1991). La prise en compte de celles-ci est donc essentielle pour concevoir une technologie adaptée à l'humain au travail. Dans le cadre du projet ANR PACBOT, nous nous sommes ainsi donnés comme premier objectif d'élaborer un modèle permettant de caractériser les variabilités selon leurs impacts sur la performance et la santé à partir des connaissances existantes sur les variabilités individuelles, techniques et organisationnelles, mais aussi des connaissances sur les facteurs de prévention de la santé. La résolution de ce premier verrou scientifique doit permettre d'intégrer, dès la conception de la technologie cobotique, la gestion des variabilités à la programmation du cobot. Ce verrou nous a amené à réaliser une analyse de l'activité sur le terrain d'étude afin d'identifier les variabilités présentes pour guider la conception de la technologie.

Pour assurer une bonne collaboration humain/cobot, il convient également d'assurer une bonne acceptation du cobot par l'opérateur (Bobillier Chaumon, 2016 ; Bobillier Chaumon, 2013). En effet, si l'opérateur n'accepte pas bien le cobot, alors il risque de mal l'utiliser, voire de ne pas l'utiliser du tout, mettant donc l'implémentation en question (Cippelletti, 2017 ; Cippelletti et al., 2023 ; Landry et al., 2022). Nous nous sommes alors donnés comme second objectif de montrer les qualités capacitanes du cobot, lorsque ce dernier est programmé pour accompagner l'opérateur dans son travail et l'alerter en cas de dépassement de ses ressources en mobilisant les connaissances existantes sur l'acceptabilité et sur l'acceptation située. Nous avons ainsi mobilisé les concepts d'acceptabilité (Davis, 1989 ; Davis et al., 1989 ; Venkatesh et al., 2003, 2012 ; Venkatesh & Bala, 2008), d'expérience utilisateur (Alben, 1996 ; Hassenzahl, 2003, 2004, 2008 ; Mahlke, 2008 ; Mahlke & Thuring, 2007) et d'acceptation

située (Bobillier Chaumon, 2016, 2021 ; Bobillier Chaumon, 2013) pour intégrer l'étude de l'acceptabilité de la cobotique dans notre protocole de conception. Pour assurer une conception technique centrée sur les besoins des opérateurs, il convient de suivre une démarche rigoureuse impliquant les futurs utilisateurs du système dès la conception de celui-ci (Barcellini, 2020 ; Barcellini et al., 2013). Ainsi avons-nous proposé une méthode de Conception Centrée Utilisateur, telle que définie par la norme ISO 9241-210 (ISO, 1999 ; Organisation internationale de normalisation, 2019), qui a constitué le troisième verrou scientifique du projet : proposer une démarche et des objets intermédiaires favorables à la coopération SHS-Programmeur pour tester les qualités capacitantes de la programmation d'un cobot. Nous avons donc mobilisé le concept de Conception Centrée Utilisateur (Anastassova, 2006 ; Barcellini, 2020 ; Barcellini et al., 2013 ; Béguin & Cerf, 2004 ; Loup-Escande et al., 2013 ; Organisation internationale de normalisation, 2019) et nous en avons appliqué les critères afin d'assurer la meilleure implémentation possible.

Cette thèse s'inscrit dans un projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche qui vise à favoriser la mise en place d'une technologie cobotique adaptée à l'opérateur humain et aux variabilités de la situation. Il s'agit d'un projet multidisciplinaire au sein duquel ont collaboré un laboratoire de psychologie (LIP/PC2S), un laboratoire d'informatique (LIG), un organisme de robotique (INRIA Bordeaux) et un laboratoire de chimie (terrain d'étude). Ainsi pour répondre aux besoins du projet et à ceux du terrain d'étude, cette thèse a poursuivi plusieurs objectifs déclinés dans la figure (Cf. Figure 1).

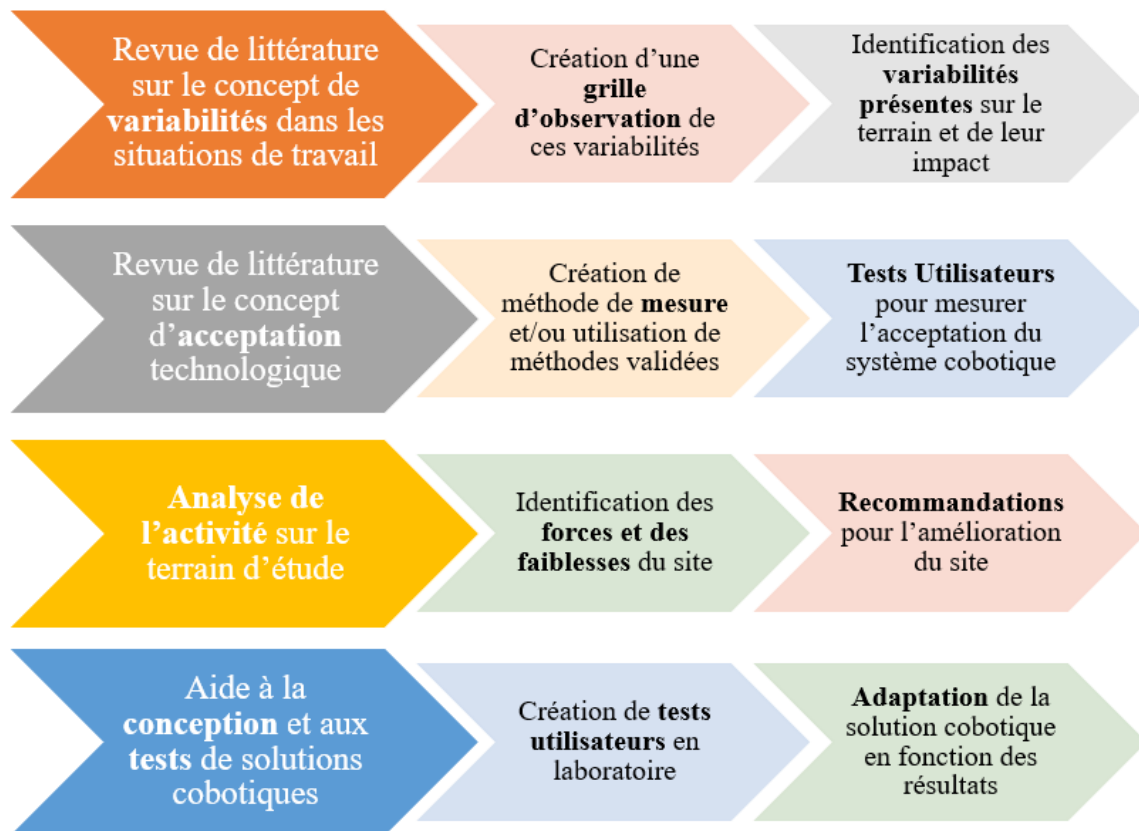


Figure 1. Objectifs de la thèse répondant aux besoins du projet ANR et au terrain d'étude

Dans une première partie, nous décrivons notre cadre théorique à travers quatre chapitres. Le chapitre 1 s'intéresse au contexte industriel dans lequel s'inscrit ce projet, à l'histoire des technologies émergentes et particulièrement à celle de la cobotique. Le chapitre 2 se focalise sur la présentation des concepts d'acceptation technologique, d'acceptabilité, d'expérience utilisateur et d'acceptation située. Il met également en lumière le processus de Conception Centrée Utilisateur, son importance dans les projets cobotiques et ses outils. Le chapitre 3 est une revue de littérature sur la notion de variabilité dans les situations de travail. Il identifie les différents types de variabilités, leurs effets sur l'opérateur et sur son activité, et les possibilités d'implémentation technologique pour la gestion de certaines variabilités. Le chapitre 4 dresse un portrait de la recherche et développement en chimie, ses leviers et contraintes et les possibilités d'aide cobotique.

Dans une deuxième partie, nous rappelons la problématique générale de cette thèse, les trois hypothèses de travail qui ont été examinées et notre méthode générale.

Dans une troisième partie, nous présentons les quatre études réalisées dans le cadre de la thèse. Premièrement, la méthode et les résultats de l'étude sur le terrain d'intervention sont présentés. Deuxièmement, la méthode et les résultats du premier tests utilisateurs sont décrits.

Troisièmement, la méthode utilisée et les résultats extraits du deuxième test utilisateur sont exposés. Quatrièmement, la méthode utilisée lors du troisième test utilisateur et les résultats qui en sont issus sont présentés. Et cinquièmement, l'étude de l'acceptabilité cobotique est décrite en détaillant la méthode et les résultats de celle-ci.

Dans une quatrième partie, nous discutons les différents résultats obtenus. Cette discussion est suivie des limites qui ont contraint cette thèse. Nous exposons ensuite les recommandations qui nous avons élaborées, suivies des perspectives de recherche que suscite cette thèse. Notre conclusion générale permet de dégager les principaux résultats de ce travail.

Cadre théorique

SECTION 1. INTRODUCTION AU CONTEXTE INDUSTRIEL ET À LA COBOTIQUE

La Commission Européenne situe l'industrie actuelle dans sa cinquième révolution, et la nomme ainsi « *industrie 5.0* » (European Commission, 2021). Or, cette recherche-action a eu lieu au sein de l'industrie française. La première partie de ce cadre théorique aura donc pour dessein de présenter les révolutions industrielles récentes ainsi que leurs origines. Dans l'industrie 5.0, des cobots sont implémentés afin de travailler aux côtés des humains. La deuxième partie aura donc pour objet l'étude des cobots afin d'explorer leurs capacités et leurs impacts sur les opérateurs.

Chapitre 1. Révolution industrielle

Dans cette partie, nous présenterons les différentes révolutions qu'a connu l'industrie française depuis ces débuts. Nous rappellerons rapidement les premières révolutions pour nous concentrer sur les dernières révolutions qui ont eu un impact direct sur la réalisation de cette thèse.

La France, principalement agraire et artisanale avant 1765, a évolué pour devenir commerciale suite à l'industrialisation ferroviaire de 1840 (Mendels, 1984; Sée, 1910). Cette transition a été rendue possible grâce à l'utilisation massive de la machine à vapeur et de son carburant : le charbon. C'est ici la première révolution industrielle qui impactera de façon considérable la société française, les emplois, et donc, les travailleurs français. Par la suite, au cours du 19^{ème} siècle et de la découverte de la « fée électricité », l'énergie électrique et pétrolière va être utilisée par l'industrie afin d'optimiser la production (Woronoff, 1995). C'est la deuxième révolution industrielle, celle de l'électricité. Dès 1969 et l'apparition de l'électronique et des technologies de l'information, la production automatisée est de plus en plus mise en place dans les industries. C'est la troisième révolution industrielle, celle de l'automatisation (Maddikunta et al., 2022).

Nous détaillerons de façon plus précise la quatrième révolution industrielle dans la partie suivante.

1.1. Industrie 4.0

L'industrie 4.0 (ou industrie du futur) a été proposée par le gouvernement allemand à partir de 2011 dans le cadre d'une stratégie de relance de l'industrie de haute technologie (Xu et al., 2021). L'industrie allemande a organisé la mobilisation des acteurs de l'économie, de la recherche et de la politique pour travailler à l'adaptation du monde du travail face à la

transformation numérique (Kohler & Weisz, 2018). Les parties prenantes du projet « industrie 4.0 » ont réussi à faire fructifier cette notion dans le paysage allemand et européen. Ce projet est issu d'un constat des faiblesses de l'industrie allemande. Le Ministère fédéral de l'économie et de la technologie a mis en valeur, grâce à un diagnostic des forces, risques, opportunités et menaces (SWOT), une baisse de la demande pour les produits allemands, ainsi qu'une montée en puissance des industries chinoises et coréennes (Kohler & Weisz, 2018). Également, le ministère note un retard de l'Allemagne en termes de technologies de l'information et de la communication, devenues incontournables dans les industries. Certains secteurs sont plus en retard que d'autres, en effet, en 2011, « seul un quart des constructeurs allemands de machines-outils ont élaboré une stratégie explicite de développement de services basés sur Internet, et seul un cinquième d'entre eux ont un modèle d'affaires adapté » (Kohler & Weisz, 2018, p. 24). Le but du gouvernement est donc d'insuffler une impulsion de changement bénéfique à l'industrie qui pourrait faire revenir les investisseurs et confirmer la place de l'Allemagne en tant que leader industriel international. De plus, face à l'Allemagne, se dresse les géants américains, Google, Apple, Tesla, champions de la gestion des données et de l'hybridation humain / machine dans les secteurs industriels. Ces méga-entreprises captent directement les données d'usage du client (ex : données de conduite récoltées par Tesla) et propose des services toujours plus adaptés afin de « *reconfigurer la chaîne de valeur* » à leur avantage (Kohler & Weisz, 2018, p. 25). Le gouvernement allemand espère donc qu'avec l'avènement de l'industrie 4.0, les enjeux du futur soient pris au sérieux par les acteurs de l'industrie allemande afin d'adapter les pratiques industrielles pour rester au niveau de la compétition internationale.

Cette industrie correspondrait à la révolution industrielle dans laquelle nous serions entrés dans les années 2010. Elle se détache des autres révolutions par le fait qu'elle désigne une utilisation massive et croissante des technologies intelligentes au sein des entreprises (INRS, 2018). C'est la révolution de la « connexion ». Tous les agents de l'industrie sont connectés entre eux et sont également connectés aux machines qui leur servent à effectuer leur travail. Cette interconnexion modifie la manière dont les opérateurs travaillent ainsi que la manière dont ils interagissent entre eux. Les entreprises peuvent, grâce à cette connexion, avoir accès à des données sur les résultats du travail ainsi que sur l'opérateur lui-même. Cette accessibilité aux données mène parfois à la surveillance accrue des opérateurs et à une augmentation des rythmes de travail (Bobillier-Chaumon, 2013). Également, « la numérisation transforme les flux d'information, modifie la production de biens ou de services, engendre de la charge mentale » (Caroly et al., 2019, p. 28).

Cependant, 10 ans plus tard, une minorité d'entreprises ont réellement débuter la pleine mise en œuvre de l'industrie 4.0 (Joblot et al., 2023; Müller, 2020). Il semblerait que les protagonistes industriels se soient concentrés sur la création de prototypes et d'études en marge du processus industriel. De plus, les nouvelles technologies pourraient avoir un effet néfaste sur l'opérateur. En effet, le but de cette industrie est d'interconnecter les machines intelligentes afin de produire toujours davantage, en se passant de l'opérateur humain (Maddikunta et al., 2022). Pour pallier cela, la Commission européenne a identifié plusieurs facteurs permettant de recentrer l'industrie 4.0 autour de l'humain et de son lieu de vie (Goujon et al., 2023). Ainsi née une nouvelle révolution industrielle : l'industrie 5.0 détaillé dans la partie suivante.

1.2. Industrie 5.0

Dès 2021, l'industrie 5.0 est annoncée par la Commission Européenne via la publication d'un rapport gouvernemental (European Commission, 2021). Cette annonce fait suite à deux ateliers virtuels organisé par le directoire « Prosperity » du directoire général de la Recherche et de l'Innovation en juillet 2020 (European Commission, 2021; Xu et al., 2021). La réflexion pendant ces ateliers s'est organisée autour de la définition suivante (European Commission et al., 2021; Müller, 2020) : « L'Industrie 5.0 reconnaît le pouvoir de l'industrie à atteindre des objectifs sociétaux au-delà de l'emploi et de la croissance, pour devenir un fournisseur résilient de prospérité, en faisant en sorte que la production respecte les limites de notre planète et en plaçant le bien-être du travailleur industriel au centre du processus de production » (European Commission, 2021, p. 5; Xu et al., 2021, p. 530). L'objectif de ce rapport est de donner une nouvelle voie à suivre pour l'industrie. Le but est que l'industrie européenne s'organise autour de l'humain qui est au centre du système de travail, et d'adapter à l'humain les différentes composantes du système afin de favoriser son bien-être (Müller, 2020). Ainsi « la promotion et l'inclusion des besoins humains sont considérées au cœur du processus de production, ce qui conduit à favoriser la valorisation des pratiques en se demandant ce que la technologie peut faire pour les travailleurs » (Goujon et al., 2023, p. 1). Le projet, à terme, est de redonner à l'industrie la « touche humaine » teintée d'intelligence, d'innovation et d'esprit créatif (Maddikunta et al., 2022). L'idéal de cette révolution industrielle serait de rassembler la vitesse et la précision des machines avec l'efficacité de la cognition humaine. A contrario de l'industrie 4.0, l'industrie 5.0 se veut résiliente face aux changements sociétaux et climatiques en poussant à une vision systémique de la solution, et non plus technologique (Maddikunta et al., 2022; Müller, 2020; Xu et al., 2021). Également, la commission européenne souhaite aider les

industries européennes à s'engager sur la voie déjà empruntée par les géants américains : la personnalisation de masse. Les clients pourraient ainsi personnaliser leur produit afin qu'il s'approche le plus possible de leurs besoins et de leurs goûts (Maddikunta et al., 2022). Une réflexion doit être alors menée sur la répartition des tâches. Les industriels pourraient choisir, pour préserver l'opérateur humain, de donner les tâches répétitives à la machine et les tâches nécessitant de l'esprit critique à l'humain. Cette industrie aura donc besoin d'opérateurs hautement qualifiés et spécialisés. Mais cette répartition est-elle à même de préserver l'humain et en faveur de son bien-être ? Cela mérite d'être étudié dans un contexte où, la majorité de la production sera automatisée grâce à l'influx de datas collectées en temps réel sur le client et grâce à des opérateurs spécialistes les utilisant pour adapter la production (Maddikunta et al., 2022).

La commission européenne identifie six types de technologies permettant de réaliser cet objectif (European Commission, 2021) :

- Les **technologies interactives humain / machine** qui combinent les qualités des humains et des machines.
- Les technologies biologiques et les matériaux intelligents permettant de capter des datas et d'améliorer les systèmes tout en étant recyclables.
- Les jumeaux numériques et les simulations pour modéliser des systèmes.
- Les technologies de sécurité permettant la transmission de data, de stockage et d'analyse.
- L'intelligence artificielle qui détecte les causalités complexes et les systèmes dynamiques.
- Les technologies permettant de rendre l'énergie plus efficace, renouvelable, stockable et autonome.

Cette cinquième révolution est « centrée sur des valeurs, telles que l'humain au centre, l'écologie et les bénéfices sociaux » (European Commission, 2021, p. 7). Le but est que ces technologies complètent l'humain dans son travail sans le remplacer. La commission européenne recommande ainsi six types de **technologies interactives humain / machine** (European Commission, 2021) :

- Les technologies traductrices, comprenant les gestes humains et prédictives de l'intention humaine.
- Les technologies qui traquent les tensions mentales et physiques, ainsi que le stress des opérateurs.

- **Les technologies robotiques comme les collaborateurs robots (cobots) qui travaillent avec l'humain.**
- Les technologies augmentées, virtuelles ou mixtes.
- Les technologies qui augmentent les capacités physiques humaines.
- Les technologies qui augmentent les capacités cognitives humaines.

La commission européenne recommande donc directement l'implémentation de cobots dans les industries, à condition bien-sûr qu'ils soient au service de l'humain et de son bien-être au travail.

1.3. Synthèse du chapitre

Pour résumer, notre industrie européenne actuelle suit les directives de la commission européenne qui a récemment proclamé l'industrie 5.0 (European Commission, 2021). Elle fait suite à l'industrie 4.0 déclarée par le gouvernement allemand dans une perspective de mise à niveau de l'industrie allemande face à la concurrence internationale. Cette industrie avait pour but de viser à l'ultra-connexion des industries pour maximiser la production. Dans ce contexte, la commission européenne a souhaité protéger les humains au travail en les replaçant au centre de l'appareil industriel de production. Elle a donc proclamé un changement de paradigme afin que l'humain et son bien-être restent les priorités de l'industrie. Plusieurs technologies sont alors proposées pour réussir ce challenge, notamment l'utilisation de robots collaborateurs.

Les cobots s'intègrent donc parfaitement dans cette nouvelle stratégie industrielle et recouvre toutes les caractéristiques des technologies émergentes qui sont étudiées dans le chapitre suivant.

Chapitre 2. Les technologies émergentes et leur prise en compte dans la recherche scientifique sur l'humain au travail

Les chercheurs en psychologie du travail et en ergonomie se saisissent de l'impact de ses nouvelles technologies sur les opérateurs et sur le travail. En effet, « si ces nouvelles technologies peuvent revaloriser le travail et requalifier l'individu en apportant de nouvelles ressources et capacités d'actions qui augmentent le pouvoir d'agir du professionnel [...], elles peuvent également contribuer à dénaturer l'activité et à dessaisir le sujet de tout ce qui faisait sens pour lui : dans ses pratiques et ses liens professionnels, dans ses marges de manœuvre et son rapport au travail » (Bobillier Chaumon, 2021, p. 18). Dans la partie suivante, nous allons discuter autour de ces nouvelles technologies, peu implémentées mais qui tendent à avoir un développement croissant et qui risque de bouleverser les usages des opérateurs.

2.1. Définitions des technologies émergentes

Les nouvelles technologies sont identifiées par Anastassova (2006) comme des « technologies émergentes » et il leur attribue quatre caractéristiques : l'innovation que constitue la technologie, des usages encore peu déterminés, des limites empêchant l'implémentation massive, et une certaine attente de transformation du contexte dans lequel elle va être implémentée. En effet, pour être émergentes, les technologies doivent être innovantes comparativement aux technologies déjà existantes. Elles doivent entraîner un changement de paradigme quant à la manière de réaliser son travail. Dû en partie à cette innovation, les usages que l'on peut faire de ces technologies sont encore mal définis. Les capacités, les possibilités de ces technologies étant mal connues, on peut difficilement prévoir leurs activités futures. Cette difficulté de projection, alliée avec de nouvelles contraintes techniques, limitent une implémentation massive des technologies émergentes. De plus, étant vendues par leurs concepteurs comme des technologies essentielles et innovantes, les opérateurs et les organisateurs du travail développent de nombreuses attentes envers elles. Ces attentes entrent régulièrement en contradiction avec les limites de ces technologies : manque d'adaptation aux variabilités du travail, intensification, lenteur d'exécution, etc.

2.2. Prise en compte des technologies émergentes en psychologie du travail et ergonomie

Ces technologies ne reposent pas toujours sur les besoins directement exprimés par les opérateurs, elles peuvent être notamment imposées sans discussion préalable (Bobillier

Chaumon, 2021). Les auteurs appellent ceci le « techno-push » en opposition au « techno-pull » : le Techno-push place la technologie au centre des préoccupations alors que le techno-pull place les besoins de l'opérateur au centre pour concevoir une technologie adaptée. Ces technologies peuvent avoir trois grandes fonctions selon Bobillier Chaumon (2016) :

- Elles peuvent être supplétives, c'est-à-dire qu'elles « renforcent ou complètent les capacités des individus au travail afin d'optimiser leurs actions en termes de rapidité, de précision, de réactivité ou de fiabilité » (Bobillier Chaumon, 2016, p. 27) ;
- Elles peuvent être substitutives, c'est-à-dire qu'elles vont remplacer l'humain dans l'activité car elles sont considérées comme plus fiables que celui-ci par les organisateur du travail (Bobillier Chaumon, 2016) ;
- Elles peuvent être palliatives, c'est-à-dire qu'elles vont venir combler un manque de capacités chez l'humain issu des changements de l'activité de travail ou des changements chez l'opérateur lui-même (Bobillier Chaumon, 2016).

Bobillier Chaumon (2021) identifie cinq paradoxes découlant de la diffusion des technologies dans le monde du travail :

- Perte et gain de contrôle sur sa propre activité : l'opérateur peut avoir plus de contrôle grâce à la technologie (ex : plus de précision, accès aux données enregistrées) mais, dans le même temps, perdre du contrôle sur certaines tâches qu'il a déléguées à la technologie.
- Invisibilisation et sur-visibilisation de l'activité : l'opérateur peut effectuer des tâches annexes (invisibles) pour veiller au bon fonctionnement de la technologie et être contrôlées par celle-ci (ex : capteurs, caméra) pour veiller au bon déroulement de l'activité (sur-visibilisation).
- Accroissement des équipes virtuelles et isolement des opérateurs : grâce aux outils de travail à distance, l'opérateur peut être connecté à de grandes équipes de travail mais sans l'être physiquement (parfois même sans les avoir rencontrées), un certain isolement peut alors être perçu, alors même que l'opérateur a de nombreux collègues.
- Nomadisme et sédentarité au travail : les technologies, notamment permettant le télétravail, peuvent amener l'opérateur à changer de bureau plus régulièrement, à voyager. Elles peuvent également contraindre l'opérateur à être figé derrière son bureau pour travailler, là où avant, celui-ci allait rencontrer physiquement ses collègues pendant les pauses ou pour du travail en groupe.

- Distanciation et trop grande proximité entre l'opérateur et son travail : les nouvelles technologies permettent de déléguer son travail et ainsi de se distancer de celui-ci ; en revanche, la multiplication du travail à distance possible grâce à ces technologies floutent les frontières entre la vie personnelle et la vie professionnelle.

L'auteur craint particulièrement l'impact de la surestimation des capacités de ces technologies émergentes par les organisateurs du travail qui pourraient renvoyer l'humain à un simple exécutant, moins performant. Cependant, ces technologies sont pour la plupart très éloignées du contexte de travail et poussent, encore, l'humain à s'adapter à leur façon de réaliser la tâche.

Pour mieux définir les besoins des utilisateurs finaux, il conviendrait de mobiliser les modèles de l'acceptabilité des technologies (Davis et al., 1989 ; Venkatesh et al., 2003), l'expérience utilisateur (Mahlke & Thuring, 2007 ; Martin, 2018), acceptation située (Bobillier Chaumon, 2016) et la conception participative (Barcellini et al., 2013). Le but étant de replacer l'humain au centre des décisions organisationnelles ainsi qu'au centre de la conception des technologies émergentes dans une articulation entre démarche de conception centrée utilisateurs et démarche d'intervention (Azouaghe & Landry, 2021 ; Landry et al., 2022). Il convient de revenir aux fondamentaux de l'ergonomie : il est nécessaire de mobiliser une analyse de l'activité pour faire émerger les besoins des utilisateurs, mais aussi d'usage avant l'implémentation d'une solution technologique (Anastassova, 2006). Cela permet ainsi une meilleure adaptation et une meilleure acceptabilité de la technologie par les utilisateurs (Damodaran, 1996). Malheureusement, les études publiées s'intéressant à l'analyse des besoins en amont de l'implémentation ne sont pas majoritaires parmi les études qui parlent d'une technologie en particulier (Kjeldskov & Graham, 2003) alors que cette étude peut éviter la non-utilisation ou la mauvaise utilisation d'une technologie par l'opérateur (Cippelletti, 2017).

Dans le but d'optimiser l'implémentation des technologies émergentes dans une activité de travail, Compan et al. (2022) ont créé un modèle guidant la mise en place de nouvelles situations de travail : la situation de collaboration capacitante (*Enabling Collaborative Situation*, ECS). L'intérêt de cette approche est de développer des situations de travail « capacitantes », c'est-à-dire des situations qui donnent toutes les capacités nécessaires à l'opérateur pour évoluer par son travail. C'est une situation « qui met des ressources à disposition des individus et leur permet de les utiliser » (Fernagu Oudet, 2012, p. 6) et qui « permet aux individus de développer de nouvelles compétences et connaissances, d'élargir leurs possibilités d'action, leur degré de contrôle sur leur tâche et sur la manière dont ils la réalisent » (Compan, 2022, p. 51). Pour permettre à une situation d'être capacitante, plusieurs points sont à étudier. Premièrement, il faut un accompagnement au changement qui permette aux opérateurs de comprendre la

technologie, les raisons de sa mise en place et son fonctionnement. Deuxièmement, la future situation de travail doit être coconstruite avec les opérateurs (ex : groupe de travail, simulation) pour garantir l'acceptabilité de cette nouvelle dynamique de travail humain/technologie. Troisièmement, l'utilité de la technologie doit être évaluée de façon précoce durant le projet afin de ne pas entrer dans une forme de techno-push. Pour analyser si une situation est capacitante en situation d'implémentation technologique, l'ECS possède des critères et des dimensions exposés dans le tableau ci-dessous (Cf. Tableau 1).

Tableau 1. Critères de l'ECS, dimensions et critères pragmatiques associés (Compan, 2022, p. 72-73)

Critères de l'ECS	Dimensions associées	Critères pragmatiques associés
	Utilité	L'opérateur doit pouvoir accomplir ce qu'il souhaite effectuer, la technologie ne doit pas empêcher ses actions.
Critère 1 de l'ECS : Apprentissage d'une nouvelle manière de faire plus performante et maintien de cet apprentissage	Affects, aspects hédoniques de l'UX et sensibilité à l'Acceptation	Le rapport de signification construit par l'opérateur lors de l'usage de la technologie émergente, ce à quoi l'opérateur accorde de la valeur en activité ainsi que ses ressentis au contact de la technologie émergente doivent être favorables au bon déroulement de son activité. L'opérateur doit accepter, en situation, la technologie émergente.
Critère 2 de l'ECS : Accroissement des possibilités et des manières de faire	Marge de manœuvre situationnelle	L'opérateur doit disposer de plusieurs manières efficaces de travailler (au moins 2 modes opératoires, distincts et satisfaisants) en fonction de ses préférences et des variabilités rencontrées.
Critère 3 de l'ECS : Ajustement des attributs du couple en fonction de l'évolution des situations dans le temps	Genèses instrumentales et conception continuée dans, par et pour l'usage Entraide des pairs	L'opérateur doit avoir la possibilité de s'approprier la technologie émergente et la situation de travail (genèses instrumentales : instrumentation/instrumentalisation). L'opérateur doit également avoir la possibilité de modifier sa situation de travail ainsi que la technologie émergente. L'opérateur en activité doit disposer d'une source de soutien auprès de ses pairs (partage d'informations, aide, etc.).

	Transparence opérative		L'opérateur doit comprendre suffisamment le fonctionnement de la technologie. Il doit pouvoir interpréter la situation actuelle en fonction de l'historique et pouvoir interpréter les effets des actions.
	Réflexion individuelle		L'opérateur doit être en situation de prendre sa propre activité de travail comme objet d'analyse. L'opérateur ne doit alors pas être débordé par la tâche à accomplir.
	Management de confiance et de responsabilisation		L'opérateur doit voir son autonomie et sa responsabilisation favorisées par son management.
	Espaces de débat sur le travail et temps de régulation collective		L'opérateur doit disposer de temps de régulation collective et d'espaces de débat sur le travail lors desquels sa voix peut être entendue. La majorité des acteurs (hiérarchie, ingénieurs, pairs, etc.) doivent être régulièrement présents.
Conduite du changement (absent de l'ECS mais peut en favoriser la conception)	Accompagnement au changement	au	Des présentations de la technologie émergente et de la future situation de travail doivent être effectuées en amont de l'implémentation. Ces présentations doivent être accompagnées de présentations sur les raisons du changement. Enfin, un individu « expert » de la technologie émergente doit aider à la prise en main de celle-ci par l'opérateur. D'autres modalités d'accompagnement au changement pourront être mises en place.
	Co-conception		La situation de travail doit être co-construite en impliquant une diversité d'acteurs.
	Évaluation précoce de l'utilité		Il est nécessaire d'effectuer une évaluation précoce de l'utilité de la technologie émergente assez tôt dans le processus de conception.

L'ECS a été utilisée sur des postes de travail ayant fait l'objet d'une implémentation technologique récente. L'utilisation de ces critères permet de questionner le travail et les changements qui ont pu découler de l'interaction avec la technologie. Compan (2022) a évalué la pertinence des critères de l'ECS grâce à un dispositif expérimental à deux conditions : soit la situation de travail était capacitante (haut respect des critères), soit elle était peu capacitante (bas respect des critères). Les participants semblent globalement plus satisfaits de la situation lorsque celle-ci a des hauts critères d'ECS. Cette proposition théorique est donc prometteuse, elle nécessite néanmoins plus d'investigations.

2.3. Synthèse du chapitre

La littérature scientifique en ergonomie et en psychologie du travail a défini les technologies étudiées dans cette thèse comme des « technologies émergentes ». Ces technologies se caractérisent par l'innovation qu'elles représentent, les usages indéterminés qu'elles permettent, les limites que contraignent leur implémentation ainsi que par les attentes de transformation qu'elles suscitent. Les auteurs ont remarqué un techno-push (imposition de la technologie sur les opérateurs) inquiétant qui ne favorise pas une organisation du travail optimale pour les opérateurs, pour l'entreprise et pour l'acceptation de la technologie implémentée. Nous soulignons l'importance de réaliser une analyse de l'activité des opérateurs avant et/ou pendant la conception de la technologie afin de mieux connaître les besoins des opérateurs et de la tâche pour proposer des nouveaux process optimaux avec la nouvelle technologie. Cette nécessité a été conceptualisée par Compan (2022) avec la création des critères de l'ECS. Grâce à ces critères, créer une situation de travail capacitante pour les opérateurs est plus aisé.

Les robots collaborateurs entrent parfaitement dans les catégories définies par Anastassova (2006) des technologies émergentes. En effet, ils sont innovants car ils proposent un changement en rupture totale avec l'activité des robots en industrie. Ils proposent une collaboration directe là où les anciens robots en industrie étaient placés dans des cages, loin des humains, pour des raisons de sécurité (Peshkin & Colgate, 1999). De par leur nouveauté et leurs capacités qui évoluent très rapidement, il est difficile d'en établir des usages précis dans les situations de travail (Liu et al., 2022). C'est en partie la raison qui limite l'implémentation massive des cobots en industrie. En effet, malgré l'augmentation des recherches sur les cobots (Liu et al., 2022), ceux-ci peinent à être réellement implémentés en industrie (Knudsen & KaiVo-Oja, 2020). Malgré leur faible présence, les opérateurs et les organisateurs du travail développent certaines attentes envers la collaboration cobotique (Cippelletti et al., 2023). Pour aller plus loin, le concept de « cobot » sera donc détaillé dans la partie suivante.

Chapitre 3 : Les robots collaborateurs

3.1. Définition des cobots

Pour comprendre ce qu'est un cobot, il faut s'assurer de savoir en premier lieu ce qu'est un robot. Selon Salotti et al. (2018, p. 3), un robot est « un système mécatronique comportant un ensemble de capteurs, un corps tangible, un microcontrôleur programmable et un système moteur pourvu d'actionneurs pour la manipulation ou la locomotion ». Les auteurs reconnaissent que leur définition est un peu trop large et qu'elle peut englober d'autres systèmes (ex : voiture). Cependant, elle est suffisante pour appréhender les robots collaborateurs industriels. Grâce à celle-ci, nous comprenons que les cobots sont des systèmes mécaniques et électroniques avec un corps physique conçus pour être capables de collaborer avec des opérateurs sur une tâche. Le terme « cobot » est un néologisme proposé par Peshkin et Colgate (Colgate et al., 1996) se référant à une technologie robotique programmée pour collaborer avec l'humain. Les auteurs définissent ce type de technologie comme « un système robotique, qui manipule les objets en collaboration avec un opérateur humain² » (Colgate et al., 1996, p. 1). Les cobots diffèrent des robots traditionnellement utilisés en industrie en ce sens qu'ils ne sont pas enfermés dans une cage loin de la zone de travail de l'humain (Hentout et al., 2019). Au contraire, le cobot et l'humain partage la même zone de travail, ils sont « essentiellement conçus pour une interaction directe, physique avec l'opérateur humain³ » (Colgate et al., 1996, p. 1). Les fabricants semblent utiliser le terme de cobots pour désigner les robots possédant suffisamment de dispositifs de sécurité pour travailler au contact de l'opérateur humain, or la cobotique ne se limite pas à l'étude des cobots, mais plutôt « à l'interaction, directe ou téléopérée, entre opérateur(s) humain(s) et système(s) robot pour atteindre un objectif commun » (Moulières-Seban, 2017, p. 22). Le but est la collaboration entre les deux : le cobot et l'humain (Peshkin & Colgate, 1999). Par sa présence, et par son appui à l'activité de l'humain, le cobot vient modifier les marges de manœuvres d'une situation de travail (Couroussé & Florens, 2007). Ainsi, d'après Djuric et al. (2019 ; 2016) les forces de chacun sont exploitées : la dextérité et le raisonnement pour l'humain, la force et la précision pour le

² En anglais dans le texte : « *a robotic device, which manipulates objects in collaboration with a human operator* » (Colgate et al., 1996, p. 1)

³ En anglais dans le texte : « *robots essentially designed for direct, physical interaction with human operators* » (Colgate et al., 1996, p. 1)

cobot. Cet équilibre pourrait permettre de réduire l'impact du travail sur la santé de l'humain, notamment les expositions aux facteurs de risque de troubles musculosquelettiques (Cippelletti et al., 2023) et remettre l'humain au centre du travail en industrie à condition que le sens du travail de l'activité humaine soit préservée. La figure ci-dessous représente un robot industriel traditionnel ainsi qu'un cobot industriel avec pour chacun, une liste des caractéristiques qui leur sont propres (Cf. Figure 2).



	
<p style="text-align: center;">Robot industriel traditionnel (Padget Technologies, 2020)</p>	<p style="text-align: center;">Cobot industriel (https://www.wiredworkers.io/cobot-arm/)</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Installation fixe • Tâche répétitive • Pas de collaboration • Lot médium et grand • Très rapide 	<ul style="list-style-type: none"> • Mobile • Flexible au changement de tâche • Collaboration • Tout type de lot • Lent

Figure 2. Illustration de la différence entre un robot et un cobot industriel avec leurs caractéristiques associées (inspiré de Knudsen et Kaivo-Oja, 2020).

La littérature scientifique présente un dilemme : les cobots ne sont que peu implémentés dans l'industrie (Knudsen & KaiVo-Oja, 2020), cependant ils semblent faire l'objet d'un intérêt grandissant (Hentout et al., 2019). Hentout et al. (2019) ont réalisé une revue de littérature sur la décennie 2008-2017, qui indique un intérêt croissant de la recherche scientifique pour cette technologie à travers les années. Les auteurs proposent plusieurs pistes de recherche pour améliorer leur implémentation, ils conseillent notamment d'axer la recherche sur l'élaboration des interactions cognitives entre humains et cobots. Knudsen et Kaivo-Oja (2020) ont effectué une revue de littérature sur les mots "cobots" ou "collaborative robot" dans la base de données « *Web of Science* » et ont remarqué que l'utilisation de ces mots a augmenté depuis 2015. Nous avons effectué la même recherche et trouvons un résultat similaire, et ceci encore plus sur les dernières années (Cf. Figure 3) :

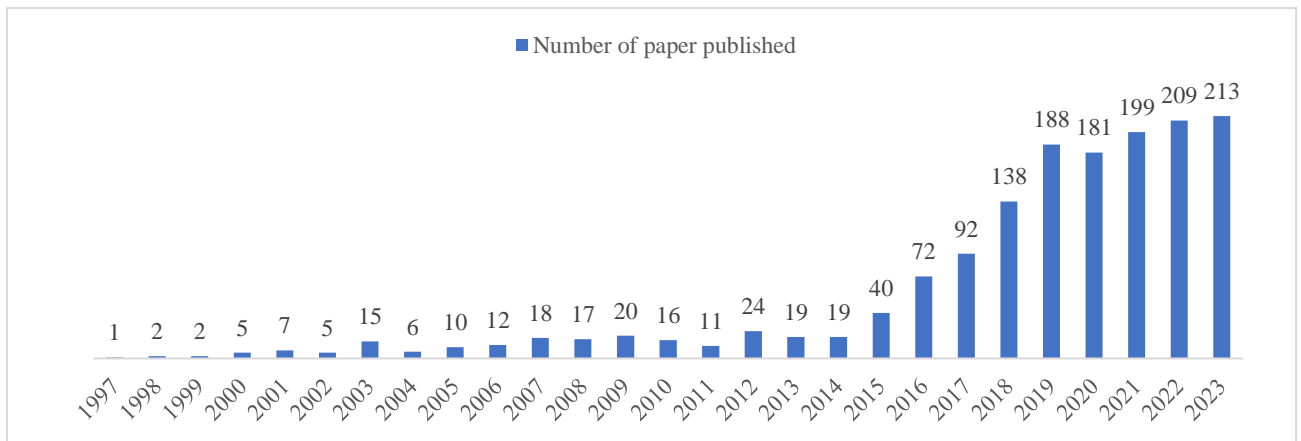


Figure 3. Nombre de publications via le Web of Science utilisant le terme “cobot” ou “cobot collaboration” dans leur titre.

Dans leur revue de littérature, Liu et al. (2022) ont analysé les études s’intéressant aux cobots industriels. Ils ont pu mettre en évidence que les chercheurs européens se saisissaient particulièrement de cette question. En effet, parmi les articles sélectionnés, 69% étaient européens. Liu et al. (2022) ont également montré que les cobots étaient principalement implémentés aujourd’hui pour aider les opérateurs à réaliser des tâches très physiques et / ou répétitives. Cependant, il est à noter que les chercheurs s’interrogent de plus en plus sur la meilleure façon de diminuer les risques liés au travail grâce à l’interaction humain / cobot (Liu et al., 2022).

Afin d’étudier la cobotique, il convient de comprendre ce qu’est une interaction entre un humain et un cobot. Cette interaction est, comme le néologisme « cobot » l’indique, une collaboration. Mais qu’est-ce qu’une collaboration ? La collaboration est le but intrinsèque de la cobotique (Colgate et al., 1996). C’est la différence majeure entre la robotique traditionnelle et la cobotique (Knudsen & KaiVo-Oja, 2020). Il existe plusieurs définitions de la collaboration (Knudsen & KaiVo-Oja, 2020). Certains auteurs (e.g., Bendel, 2018) considèrent que la coopération vise plutôt les robots industriels traditionnels qui travaillent à la réalisation d’un but commun, et que les cobots collaborent avec l’humain car ils travaillent aux côtés de celui-ci sans aucune barrière (El Zaatari et al., 2019). Ces mêmes auteurs définissent 4 types de collaboration pour caractériser le travail humain / cobot : 1. la collaboration **indépendante** (les deux agents travaillent à des tâches différentes pour un but différent mais partagent un même espace de travail), 2. la collaboration **simultanée** (les deux agents travaillent à la même tâche en même temps mais pour des buts différents, ils ne dépendent pas l’un de l’autre), 3. la collaboration **séquentielle** (les deux agents travaillent de façon séquentielle sur la même tâche,

l'un dépend de l'autre par la réalisation de sa propre tâche), et 4. la collaboration **de soutien** (les deux agents travaillent sur la même tâche de façon interactive et sont complètement dépendants l'un de l'autre). Actuellement, en industrie, les collaborations que l'on retrouve le plus sont les collaborations indépendantes et simultanées (El Zaatari et al., 2019). En revanche, dans le contexte de la recherche, l'intérêt se porte davantage sur la collaboration séquentielle et en soutien (Knudsen & KaiVo-Oja, 2020). Les théories de l'activité ont aussi proposé des réflexions sur la collaboration humain/machine en investiguant plus précisément le rôle de l'artefact (objet technologique) dans l'interaction (Vygotsky, 1930). Dans celui-ci, la collaboration avec la technologie est une activité médiatisée, c'est-à-dire qu'il y a un médium entre l'humain et l'objet de son travail, il utilise cet artefact dans son activité pour réussir la tâche qui lui a été confiée. Dans le cadre de la collaboration cobotique, le cobot fait partie des « médiations visant l'action sur l'objet (transformation, gestion régulation, etc.) que nous appelons médiations pragmatiques à l'objet » (Folcher & Rabardel, 2004, p. 9). Dans le cadre de cette thèse, nous avons décidé d'approfondir le type de collaboration avec le degré le plus élevé d'interdépendance, c'est-à-dire la collaboration en soutien dans le cadre d'une activité médiatisée. Les deux agents du système travaillent dans le même espace de travail, à la même tâche, de façon interactive. Scholtz (2003) ont créé une classification se basant sur la fonction de l'opérateur au sein de la collaboration. En effet, ils proposent six catégories différentes de collaboration en fonction du rôle que joue l'humain dans la situation de collaboration. Parmi elles, quatre peuvent être appliquées au domaine de la cobotique. Dans une situation de collaboration, l'opérateur peut être un « *operator* » s'il « opère [...] le cobot, qui a en général une très faible autonomie décisionnelle », un « *coworker* » s'il « travaille dans le même environnement que le robot, en parallèle, et a parfois quelques interactions avec lui », un « *supervisor* » s'il « fournit des instructions au cobot et vérifie éventuellement la qualité du travail [...] les instructions doivent être fournies alors que le cobot est en fonctionnement », et un « *bystander* » s'il « est présent dans le même environnement que le robot et entre parfois dans sa zone de travail, sans toutefois avoir de réelle interaction avec lui » (Salotti et al., 2018, p. 3). Dans le cadre de notre recherche, nous nous intéressons à la collaboration permettant le plus d'échanger des informations et de partager des actions conjointes entre l'humain et le cobot. Dans nos études, les humains seront donc des « *coworkers* » du cobot, ce que l'on pourrait traduire par « collègues » ou « collaborateurs ».

Cette partie nous a permis de comprendre que la collaboration, notamment cobotique, a plusieurs définitions. Dans nos travaux, nous nous penchons sur la collaboration qui requiert le plus d'interdépendance entre l'humain et le cobot. En effet, cela correspond à la définition de

la collaboration communément adoptée en ergonomie et définie par De La Garza et Weill-Fassina (1995). Cependant, ce type de collaboration est techniquement difficile à mettre en œuvre pour le moment en situation réelle de travail, la mise au point de cette nouvelle forme de travail nécessite des tests utilisateurs en condition expérimentale. Nous avons donc une chance unique d'étudier les impacts sur les humains de la collaboration cobotique avant qu'elle ne soit implémentée massivement en industrie. Il convient à présent de mieux identifier l'état d'implémentation de la technologie cobotique afin de mieux appréhender le contexte de cette étude.

3.2. État des lieux de l'implémentation des cobots

Comparativement aux robots industriels traditionnels, les cobots font partie d'un marché relativement petit, touchant des entreprises de taille moyenne sortant des petits lots de produits customisables (Knudsen & KaiVo-Oja, 2020). En 2018, la valeur de ce marché était relativement restreinte avec des échanges à seulement \$600 millions (Sharma, 2019). Les capacités restreintes des cobots limitent leur implémentation aux grandes industries qui ont besoin de technologies rapides et capables de porter des charges très lourdes (Liu et al., 2022). Cela peut s'expliquer par le coût de production des cobots élevé pour les entreprises moyennes qui vont par la suite devoir customiser certains composants pour que le cobot soit adapté à une tâche précise (Thallemer et al., 2018). L'implémentation des cobots requiert certaines capacités en programmation, contrairement aux robots traditionnels. Cependant, une fois implémenté, ils sont supposés améliorer la flexibilité de la production (Bloss, 2016). Bien que leur implémentation soit faible, celle-ci est particulièrement en augmentation depuis les dix dernières années (Hentout et al., 2019). La valeur du marché de la cobotique industrielle va continuer d'augmenter dans les prochaines années (Murphy, 2017 ; Sharma, 2019). L'entreprise Universal Robots a été la première à vendre un cobot commercial en 2008. Dix ans plus tard, celle-ci vendait son 25 000^{ème} cobot (Crowe, 2018). A la suite de cette réussite, d'autres entreprises leader en robotique ont rejoint le marché de la cobotique (Bogue, 2016). Depuis, la demande augmente de façon constante, certainement aidée par les objectifs affichés de l'industrie 4.0 et 5.0.

Cette implémentation étant en augmentation, de plus en plus d'opérateurs humains se retrouvent donc à devoir collaborer avec un cobot, situation qui modifie complètement leur manière de travailler et d'appréhender leur travail (Bader et al., 2021 ; Schoose, 2022). En effet, comment être certains que la collaboration cobotique n'a pas d'impact négatif sur le

travail et sur les opérateurs humains eux-mêmes ? La prochaine partie aura donc pour but d'identifier les impacts, positifs et négatifs de la collaboration cobotique sur les opérateurs humains.

3.3. Effets de l'usage de la cobotique

Selon Bloss (2016), la cobotique aurait la capacité de devenir la technologie la plus dominante dans les années à venir. Sur quoi s'appuie une telle déclaration ? Dans la partie suivante, nous allons aborder les impacts qu'ont les cobots dans le monde du travail. Pour cela, nous allons classer les impacts en plusieurs catégories : la première partie identifie les impacts positifs et la deuxième partie s'attarde sur les impacts négatifs. Nous nous intéressons ici aux impacts positifs sur les opérateurs humains avec lesquels ils collaborent ainsi sur les performances de l'entreprise qui les engagent.

3.3.1. Effets positifs de la cobotique

Les cobots ont de nombreux avantages, référencés par des études en laboratoire et sur les lieux de travail où ils ont été implémentés. Globalement, dans un système de travail humain / robot, « les humains restent la ressource la plus flexible du système⁴ » (Knudsen & KaiVo-Oja, 2020, p. 14). La collaboration permet aux qualités des robots et aux qualités des humains de s'exprimer (Knudsen & KaiVo-Oja, 2020). Ceci semble être efficace dans les premières expérimentations étudiant ce nouveau type de collaboration (Bloss, 2016). C'est là leur principal atout : ils permettent de mettre en valeur les capacités de l'humain et comblent ses faiblesses. Ils ont également la capacité de s'adapter aux variabilités de la situation de travail, notamment aux stratégies de l'humain (Fournier et al., 2022), à la difficulté de la tâche (Fournier et al., 2024 ; Cf. Étude 3) et à la dangerosité de la tâche (Cf. Étude 4). Grâce à cette adaptation, ils diminuent la charge de travail (Fournier et al., 2022, Fournier et al., 2024 ; Cf. Étude 3), la contrainte physique (Maderna et al., 2020), réduisent le temps de traitement de la tâche et permettent aux opérateurs de travailler sur plusieurs tâches en même temps (Román Ibáñez et al., 2021). La collaboration cobotique appuyée par des algorithmes de planification de tâches permet de sélectionner de façon optimale les tâches à répartir entre le cobot et l'opérateur

⁴ En anglais dans le texte : « *humans remains the most flexible resource in the system* » (Knudsen & KaiVo-Oja, 2020, p. 14)

humain, ce qui s'est avéré être efficace pour remplacer les tâches manuelles et à faible valeur ajoutée (Accorsi et al., 2019 ; Antonelli & Bruno, 2019 ; Kinast et al., 2021 ; Yuan et al., 2021). Or, lorsque l'implémentation amène à une allocation de tâche pertinente entre humains et cobots, on remarque une amélioration des conditions de travail (Makrini et al., 2019 ; Salunkhe et al., 2019) permettant de diminuer les risques au travail (Cf. Étude 4 ; Realyvásquez-Vargas et al., 2019). Notamment, une étude a montré qu'une collaboration humain / cobot induit moins de charge biomécanique qu'une collaboration humain / humain (Bouillet et al., 2023). Les tâches qui peuvent leur être allouées sont nombreuses et de natures diverses. En effet, les cobots sont parfois capables de reproduire les mouvements humains avec dextérité ce qui permet de leur allouer un panel de tâches plus larges (O'Shea et al., 2021). Leur utilisation permet également une solution plus économique dans le cadre d'une automatisation d'une manufacture (Weckenborg & Spengler, 2019). Leur plus grande flexibilité donne lieu à une meilleure adaptation du système de travail aux nouveaux environnements et aux nouveaux produits (Johnson et al., 2021 ; Lee et al., 2020), notamment grâce à une optimisation de leur apprentissage en utilisant des méthodes de deep learning (Miguel Lázaro et al., 2019). L'implémentation d'une collaboration cobotique peut permettre d'améliorer la précision du système de travail (Alebooyeh et al., 2020), ainsi que sa productivité de 35% (Galín et al., 2020 ; Kábele & Edl, 2020). L'utilisation d'un cobot permet de faire monter les opérateurs en compétences (Quenehen et al., 2019), d'améliorer la qualité de la tâche industrielle (Cf. Étude 3 ; Salunkhe et al., 2019) et de diminuer la variabilité des résultats de la tâche (Fager et al., 2019 ; Cf. Étude 3). Grâce à ces bénéfices, les opérateurs se sentent valorisés dans leur travail avec le cobot et l'acceptent sur leur poste de travail (Compan et al., 2022). Les variabilités humaines sont également prises en compte avec cette programmation plus flexible. En effet, la technologie cobotique peut s'adapter à la variabilité d'expérience des utilisateurs afin d'optimiser l'interaction (Wojtynek et al., 2020).

Malgré tous les bénéfices que semblent apporter les cobots, nous allons maintenant identifier les effets négatifs potentiels que les cobots peuvent avoir sur leurs « coworkers » humains et sur la performance des entreprises afin d'en tirer des pistes d'amélioration.

3.3.2. Effets négatifs de la cobotique

Un changement dans la situation de travail, malgré les bénéfices identifiés précédemment, peut avoir des effets négatifs. Les technologies émergentes, notamment les cobots, n'échappent pas à cette règle. Cependant, peu de travaux les ont mis en lumière ces impacts négatifs. Certains

impacts négatifs sont des corollaires de l'obligation du cobot de s'adapter à l'humain. En effet, les cobots travaillent régulièrement en proximité avec l'opérateur humain, leur vitesse est donc adaptée afin de le mettre en sécurité. Cette mise en sécurité a des coûts : la vitesse d'exécution d'un cobot se situe entre le tiers et la moitié de la vitesse d'un robot industriel traditionnel et il est nécessaire que le cobot soit petit et léger pour un contrôle de force optimal (Michaelis et al., 2020 In Liu et al., 2022). Les cobots doivent respecter plus de critères de sécurité que les robots industriels traditionnels afin d'être sécurisant pour l'opérateur humain (Liu et al., 2022). La plupart des cobots utilisés en industrie ont déjà des paramètres de sécurité implémentés comme l'identification automatique des distances afin d'éviter les collisions avec les humains (El Zaatari et al., 2019). Des directives sont proposées afin d'optimiser la prise en compte de la sécurité et de l'ergonomie dans l'interaction cobot / humain lors d'une tâche d'assemblage (Gualtieri et al., 2022). Pour toutes ses raisons, ils augmentent le temps de réalisation des tâches expérimentales (Fournier et al., 2022 ; Fournier et al., 2024), des tâches industrielles réelles (Compan, 2022) et impliquent une diminution des produits réalisés (Bouillet et al., 2023). De même, dans leur étude, Schoose (2022) a pu mettre en évidence la modification de gestes professionnels qu'a induit l'utilisation du cobot. Dans le cadre de l'ébarbage, certes l'effort qui était présent sans le cobot est diminué mais de nouveaux types de charges émergent (cognitives, psycho-sociales). Les informations proprioceptives sont amoindries ce qui ne permet plus aux opérateurs d'effectuer un travail de qualité selon leurs propres critères (Schoose, 2022). Une autre étude semble aller dans le même sens, les cobots ne sont pas utilisables dans une situation où l'opérateur effectue un geste professionnel complexe qui évolue au gré des retours sensoriels qu'il reçoit (Barcellini et al., 2023). De plus, le cobot semble encore incapable d'une coopération dans le sens d'une réélaboration commune des règles de l'activité comme le font spontanément des humains qui collaborent (Barcellini, 2020a). Cela limite donc son implémentation dans l'activité. Des études de cas montrent des problèmes de diminution de cadence et de bugs réguliers qui retardent le travail (Compan et al., 2022).

3.4. Synthèse du chapitre

Les cobots sont des robots créés pour une interaction directe avec l'opérateur humain (Peshkin & Colgate, 1999). Leur « *développement [...] est toujours à l'avant-garde, et les cobots présenteront à l'avenir des avantages plus importants dans les domaines économique, commercial et technologique* » (Liu et al., 2022, p. 14). En effet, il y a beaucoup d'avantages à implémenter des solutions cobotiques pour soutenir le travail humain. Ses avantages sont l'appui à l'opérateur humain, une bonne répartition des tâches, la flexibilité aux situations et la qualité augmentée dû à une résistance aux erreurs de manipulation. Cependant, ces succès sont à mettre dans un contexte de bouleversement de l'activité de travail qui peut mener à des impacts néfastes pour l'humain et pour l'entreprise. Notamment, une diminution de la vitesse d'exécution de la tâche, une sécurité amoindrie, ainsi qu'une potentielle baisse de la qualité du produit manufacturé, une perte de sens du travail, une acceptabilité sociale moindre. Cette technologie s'intègre parfaitement dans l'industrie 5.0 qui vise à placer l'humain au centre de la conception d'une industrie ultra-connectée, performante et s'appuyant sur des technologies intelligentes d'avenir afin d'offrir une concurrence sérieuse aux géants de l'industrie mondiale.

Malgré les difficultés d'implémentation qui ont été identifiées, les cobots sont de plus en plus utilisés en industrie. Une implémentation qui permettra de soutenir le travail et de veiller à la bonne gestion des variabilités pourrait permettre l'acceptation du robot collaborateur. Nous étudierons cette acceptation en cinquième partie de ce cadre théorique.

SECTION 2. ACCEPTABILITE ET ACCEPTATION SITUEE, QUELLES CONSEQUENCES DE L'IMPLEMENTATION TECHNOLOGIQUE ?

L'acceptation des technologies est un des challenges identifiés par la commission européenne pour le bon déploiement de l'industrie 5.0 (European Commission, 2021). En effet, « l'acceptation des technologies et la confiance qu'elles inspirent sont cruciales. Par conséquent, les initiatives doivent mettre l'accent sur le soutien et non sur la détermination des êtres humains, tout en maintenant le droit de la société à participer à l'idéation et à l'application des technologies et de leurs objectifs respectifs » (European Commission, 2021, p. 10).

Cette partie contient trois chapitres. Le premier chapitre présente l'acceptabilité des technologies évoquées dans les chapitres précédents afin de comprendre comment les perceptions des individus influencent leur comportement d'usage. Cependant, il convient de comprendre comment est influencée cette perception. Dans le deuxième chapitre, les facteurs entrant dans la construction de ces perceptions sont exposés via l'étude de l'expérience utilisateur (UX). Et enfin, le troisième chapitre présente l'acceptation située, modèle permettant d'évaluer l'acceptation réelle de l'utilisateur sur son poste de travail. Ce modèle est important car les concepts présentés dans les deux autres chapitres ne s'intéressent que peu à l'utilisation de la technologie au travail sur le long terme.

Chapitre 1. L'acceptabilité des technologies

1.1. Définition de l'acceptabilité

L'étude de l'acceptabilité « se propose d'évaluer et/ou de prédire les conditions et les motifs qui peuvent rendre une technologie acceptable, ou non, par les futurs usagers » (Bobillier Chaumon, 2016, p. 5). L'acceptabilité « correspondrait à une forme de jugement prospectif » pouvant être définie « comme la tendance à être plus ou moins favorable à l'usage d'une technologie avant sa diffusion » (Martin, 2018, p. 15).

Cette acceptabilité est donc une attitude en faveur ou non de l'usage d'une technologie ou/et à la technologie elle-même. Il convient d'étudier les déterminants de ces attitudes afin de mieux comprendre comment se construit l'acceptabilité. La prochaine partie s'attache à expliquer l'origine des attitudes, les perceptions, pour prédire les intentions d'usage, l'usage et l'acceptabilité des technologies.

1.2. Le rôle des perceptions dans l'intention d'usage

Il semble que la prise en compte des croyances des individus vis-à-vis de la technologie permette d'anticiper les freins et les leviers qui peuvent être présents lors de l'implémentation d'une technologie émergente (Bobillier-Chaumon, 2013). Il convient dès lors de définir ce qu'est une croyance. Kouabenan (2008) définit une croyance comme « l'attitude intellectuelle d'une personne qui tient pour vrai un énoncé ou un fait sans qu'il n'y ait nécessairement une démonstration objective acceptable de cette attitude » (p. 1). Selon Leitirand et Delhomme (2006), la probabilité subjective (que le comportement possède une certaine caractéristique), la valeur (positive ou négative) et l'accessibilité en mémoire (de la croyance) déterminent l'influence de la croyance de l'individu sur le comportement qu'il va avoir. Selon ces auteurs, l'adoption d'un comportement serait donc influencée par ces trois déterminants de la croyance de l'individu. Les croyances qu'ont les individus vont influencer « la perception que les individus ont d'un objet, d'une personne ou d'une situation » (Cippelletti, 2017, p. 75). Les perceptions des individus peuvent être définies comme le processus de traitement (sélection, organisation et interprétation) des informations externes (Hellriegel & Slocum, 2006). Ces perceptions influenceront par la suite notre comportement, notamment comme l'a montré Kouabenan (2008), notre comportement de prise de risque. Ces perceptions, issues des croyances, vont influencer l'attitude de l'individu envers l'objet en question (Hellriegel et Slocum, 2006). L'attitude est le « sentiment général favorable ou défavorable d'un individu envers un objet » (Fishbein & Ajzen, 1975, p. 216). Hellriegel et Slocum (2006) complètent en indiquant que les attitudes sont durables et qu'elles sont le reflet des expériences de l'individu (Cf. Figure 4). Fishbein et Ajzen (1975) trouvent dans la formation de l'attitude un automatisme issu des croyances de la personne. Un individu ayant une croyance va immédiatement construire une attitude vis-à-vis de l'objet en question en se basant sur les croyances qu'il possède. Cette attitude renferme plusieurs dimensions différentes, étroitement connectées entre elles (Hellriegel et Slocum, 2006) : la dimension cognitive, qui se réfère aux perceptions qu'a l'individu de l'objet, la dimension affective, qui se réfère aux émotions que l'objet provoque à l'individu, et la dimension conative, qui se réfère aux intentions comportementales que l'individu a vis-à-vis de l'objet (Ajzen, 1989, p. 244).

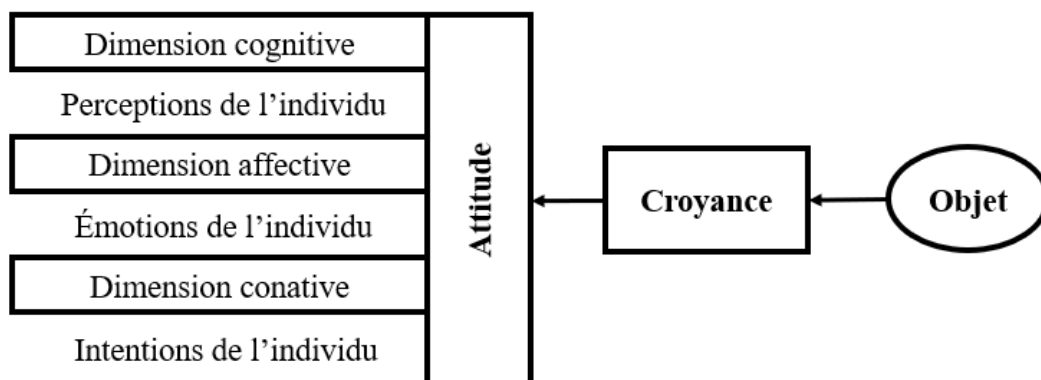


Figure 4. Modèle des dimensions de l'attitude inspiré par Hellriegel et Slocum (2006)

Il convient à présent de s'interroger sur le lien entre l'attitude de l'individu et son comportement. En effet, une attitude positive ou négative envers une technologie pourrait influencer un comportement d'utilisation ou de non-utilisation. Certains auteurs ont pu trouver un lien significatif entre l'attitude et le comportement (Fishbein & Ajzen, 1975) alors que d'autres non (Davis, 1989). Ces résultats contradictoires pourraient être expliqués par trois facteurs différents. Premièrement, la spécificité de l'attitude et du comportement (Hellriegel et Slocum, 2006) aurait un impact sur le lien plus ou moins significatif entre l'attitude de l'individu et de son comportement, de sorte qu'une attitude spécifique amènera un comportement spécifique et qu'une attitude globale amènera un comportement global. Deuxièmement, plus le temps entre la mesure de l'attitude et le comportement est court et plus le lien entre les deux sera cohérent (Hellriegel & Slocum, 2006). Troisièmement, l'activation de l'attitude en mémoire de l'individu occasionnerait un biais de sélection des informations qui corrobore cette attitude et donc favorisera le passage à l'acte (Fazio, 1986). En se basant sur ces concepts, des auteurs ont créé des modèles afin de prédire le comportement futur d'un individu. Ces modèles sont présentés dans la prochaine partie.

1.3. Les modèles prédictifs du comportement d'utilisation

Si on veut étudier l'acceptation, il convient de commencer par étudier les deux modèles sur lesquels se basent tous les différents modèles de l'acceptation et de l'acceptabilité : le modèle de la « *Theory of Reasoned Action*⁵ » et le modèle de la « *Theory of Planned*

⁵ Que l'on peut traduire par la « Théorie de l'Action Raisonnée »

*Behavior*⁶ » (Terrade et al., 2009). C'est deux modèles ont pour but de prédire un comportement futur. Ils s'appuient tous les deux sur l'intention comportementale.

La théorie de l'action raisonnée (TAR) de Fishbein et Ajzen (1975) a pour objectif de prédire le comportement en se basant sur l'intention comportementale de l'individu (Terrade et al., 2009). Dans ce modèle, l'intention comportementale serait capable de rendre compte de « facteurs motivationnels qui influencent un comportement, ils sont un indicateur d'à quel point les personnes [...] veulent faire des efforts pour réaliser le comportement⁷ » (Ajzen, 1991, p.188). Ce modèle présente également les attitudes envers le comportement et les normes subjectives concernant le comportement comme les déterminants de cette intention comportementale (Cf. Figure 5).

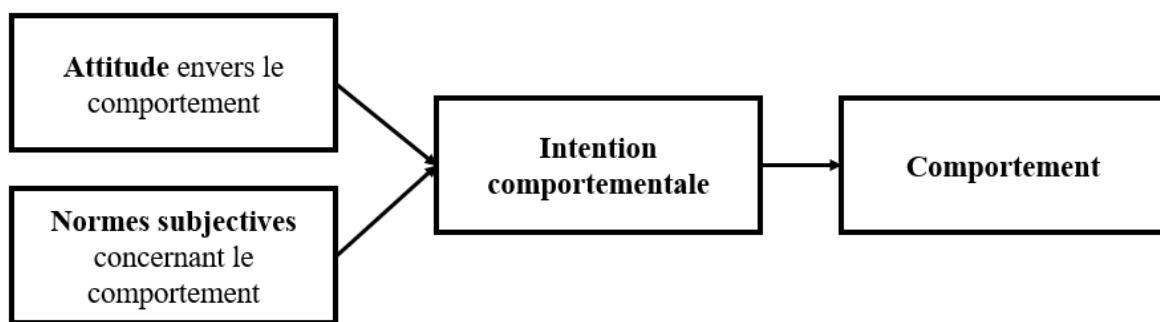


Figure 5. Modèle issu de la Théorie de l'Action Raisonnée de Fishbein et Ajzen (1975)

Dans ce modèle, les attitudes comportementales sont définies comme « la mesure avec laquelle une personne a une évaluation ou une appréciation favorable ou défavorable du comportement en question⁸ » (Ajzen, 1991, p.188). Également, les normes subjectives sont définies comme « la perception de la pression sociale exercée sur l'individu pour qu'il adopte ou non le comportement en question⁹ » (Ajzen, 1991, p.188). Ce premier modèle ainsi créé permet de mettre en valeur l'impact de l'intention comportementale sur le comportement d'introduire la notion de l'influence externe sur la décision de l'individu d'agir. Il semble

⁶ Que l'on peut traduire par la « Théorie du comportement planifié »

⁷ En anglais dans le texte : « motivational factors that influence a behavior; they are indications of [...] how much of an effort they are planning to exert, in order to perform the behavior » (Ajzen, 1991, p.188)

⁸ En anglais dans le texte : « the degree to which a person has a favorable or unfavorable evaluation or appraisal of the behavior in question » (Ajzen, 1991, p.188)

⁹ En anglais dans le texte : « the perceived social pressure to perform or not to perform the behavior » (Ajzen, 1991, p.188)

cependant être incomplet. En effet, il ne prend pas en compte le contrôle que la personne perçoit avoir sur le comportement cible (Ajzen, 1991). Pour pallier ce manque, Ajzen (1991) crée le modèle de la Théorie du Comportement Planifié (TCP). Dans celui-ci, l'auteur reprend les variables de la TAR en y ajoutant la variable du contrôle comportementale perçu (Cf. Figure 6).

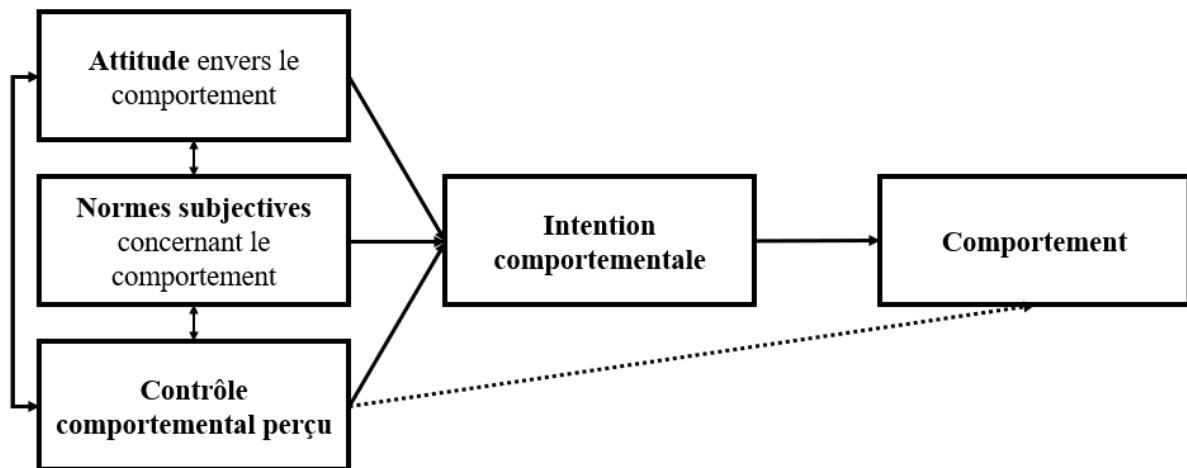


Figure 6. Modèle issu de la Théorie du Comportement Planifié de Ajzen (1991)

Cette nouvelle variable représente « la perception de la facilité ou de la difficulté d'un comportement et l'on suppose qu'il reflète l'expérience passée ainsi que les empêchements et les obstacles anticipés¹⁰ » (Ajzen, 1991, p.188). Le contrôle comportemental perçu est la perception que les moyens que l'on possède seront suffisants pour réussir l'action (Ajzen, 1991). Ces moyens sont de multiples natures. L'individu va s'interroger sur ses finances, sur le temps qu'il peut allouer à la tâche, sur ses habilités, en bref, sur toutes les ressources qu'il possède. Cette variable permet de distinguer les comportements sur lesquels l'individu pense avoir un certain contrôle, et donc un certain pouvoir d'action, et les comportements sur lesquels il considère que le contrôle est externe à lui-même et donc il aurait peu de pouvoir d'action (Terrade & al., 2009). L'auteur postule que les trois variables prédictrices de l'intention comportementale sont corrélées entre elles (Ajzen, 1991). Selon lui, le contrôle comportemental perçu, conjointement à l'intention comportementale, pourrait prédire directement le comportement car ceci a été prouvé dans de nombreuses autres études avec pour

¹⁰ En anglais dans le texte : « the perceived ease or difficulty of performing the behavior and it is assumed to reflect past experience as well as anticipated impediments and obstacles » (Ajzen, 1991, p.188)

sujet des comportements de types très diversifiés (Ajzen, 1991). Contrairement à l'intention comportementale, l'effet du contrôle comportemental sur le comportement n'est pas toujours significatif (Venkatesh et al., 2003).

Nous verrons dans la prochaine partie, les modèles qui ont essayé d'élargir les déterminants de l'attitude afin de mieux prédire le comportement. Dans la mesure où les modèles présentés dans cette partie ne prennent pas en compte les variables qui pourraient venir médiatiser les relations entre l'intention comportementale et ses prédicteurs ainsi que les relations entre comportement et ses déterminants. Les prochains modèles présentés s'attachent plus particulièrement à mesurer l'acceptabilité des technologies et ont pour objectif de combler ces différentes « carences » théoriques.

1.4. Les modèles de l'acceptabilité

L'essor des technologies a provoqué la multiplication des études traitant des mécanismes sous-jacents à l'intention d'usage des systèmes. Les chercheurs, en plus de prédire les usages, visent à appréhender l'acceptation de la technologie par les utilisateurs. Ces théories permettent la mesure des perceptions prédisant l'utilisation (Davis, 1989 ; Venkatesh et al., 2003, 2012 ; Venkatesh & Bala, 2008). L'étude de l'acceptation sociale renvoie « à l'examen des conditions qui rendent ce produit ou service acceptable (ou non) par l'utilisateur avant son usage réel et effectif » (Terrade et al., 2009, p. 3).

Dans ce champ de recherche, la première théorie centrée sur l'usage des nouveaux systèmes est celle de la Théorie de Diffusion des Innovations (Rogers, 1983). Dans son étude, l'auteur évoque plusieurs attributs de la technologie que les individus vont observer avant de faire le choix de l'utilisation. Il y a les avantages relatifs en termes économiques et sociaux, la compatibilité avec les valeurs du groupe de référence de l'individu, la complexité du système, la possibilité de tester le système et la visibilité des résultats produits par le système. Selon l'auteur, les « avantages relatifs » ou utilité perçue à l'utilisation du système sont prédictifs de l'usage. Il définit ces avantages relatifs comme le degré auquel une innovation est perçue par l'individu comme étant plus avantageuse que celles déjà existantes (Rogers, 1983). Par la suite, une étude a montré que c'est bien l'avantage relatif qui prédit le mieux l'intention d'usage (Agarwal & Prasad, 1997).

Parallèlement, le premier modèle visant à présenter les facteurs de l'intention d'usage est le Modèle d'Acceptation des Technologies ou TAM (Davis et al., 1989). Elle est basé sur la TAR

et la TCP (Ajzen, 1991 ; Fishbein & Ajzen, 1975). Ce modèle explique les facteurs influençant l'acceptation des technologies par les utilisateurs dans le cadre du travail (Cf. Figure 7).

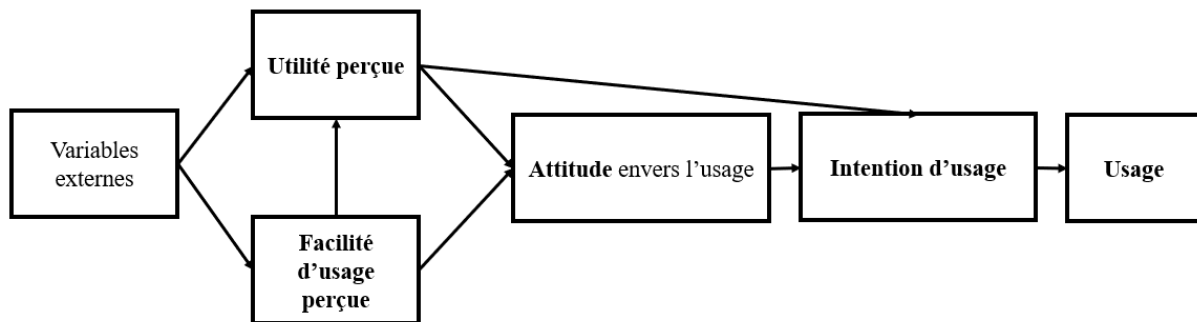


Figure 7. TAM adaptée de Davis et al. (1989)

Les auteurs concluent que c'est la perception de l'utilité et la perception de la facilité d'utilisation qui conduisent l'individu à avoir l'intention d'utiliser une technologie ou de ne pas l'utiliser. Davis (1989) définit l'utilité perçue comme « la perception subjective que l'individu a qu'utiliser le système va améliorer ses performances au travail¹¹ » (p. 985). C'est une définition contextualisée au monde du travail, le système a pour but d'améliorer le travail de l'opérateur. L'auteur définit la facilité d'utilisation perçue comme « la mesure dans laquelle l'utilisateur potentiel s'attend à ce que le système cible soit exempt d'efforts¹² » (Davis et al., 1989, p. 985). C'est la première fois que les concepts d'utilité et la facilité d'utilisation interviennent comme prédictifs de l'intention d'usage (Cippelletti, 2017). Ces deux variables influencent les attitudes envers l'usage (Davis et al., 1989). Dans son étude (Davis, 1989), l'auteur explique l'origine de l'impact de ces deux perceptions sur l'intention comportementale. Selon lui, elles sont liées au paradigme coût-bénéfice. En effet, avant tout choix, on prend en compte les bénéfices perçus, qui selon lui se traduisent par l'utilité perçue et les coûts perçus, se traduisant par la facilité d'utilisation perçue (Davis, 1989). Le TAM a fait l'objet de plusieurs méta-analyses qui confirment les effets des deux déterminants et qui mettent en valeur que l'utilité perçue joue un rôle important dans l'intention d'usage (Martin, 2018). Il est très facile à comprendre et à mettre en place grâce au questionnaire que les auteurs ont élaboré et diffusé.

¹¹ En anglais dans le texte : « the prospective user's subjective probability that using a specific application system will increase his or her job performance within an organizational context » (Davis et al., 1989, p. 985)

¹² En anglais dans le texte : « the degree to which the prospective user expects the target system to be free of effort » (Davis et al., 1989, p. 985)

Cependant, le modèle de la TAM ne prend en compte que deux variables, ce qui limite sa capacité à expliquer la variabilité de l'intention comportementale. En effet, il n'explique que 40% de l'intention comportementale et on trouve une forte variabilité de résultats entre les différentes études (Martin, 2018). Les auteurs ont donc essayé d'ajouter des variables mais la variance expliquée n'est toujours pas satisfaisante (Brangier et al., 2009).

En parallèle, d'autres auteurs ont proposé un modèle prédisant l'acceptation individuelle et l'utilisation des ordinateurs personnels ou PC (Thompson et al., 1991). Les auteurs se sont concentrés sur la prédiction de l'usage et n'ont pas étudié l'intention comportementale. Cependant, leur modèle est très intéressant car il indique plusieurs variables qui n'avaient pas été identifiées jusqu'ici. Le modèle contient six prédicteurs de l'usage (Figure 8).

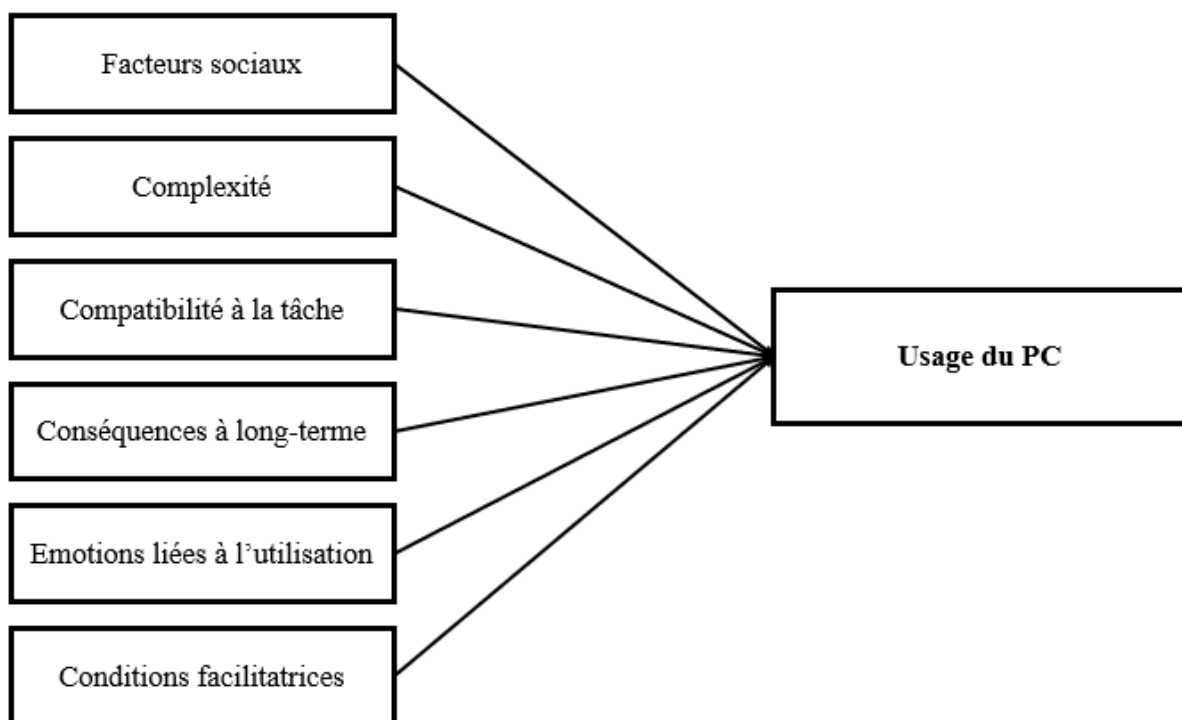


Figure 8. Modèle de l'utilisation de PC (Thompson et al., 1991)

Les « facteurs sociaux », ou « *social factors* », sont définis comme « l'intériorisation par l'individu de la culture subjective du groupe de référence, et les accords interpersonnels spécifiques que l'individu a passés avec d'autres personnes, dans des situations sociales spécifiques¹³ » (Thompson et al., 1991, p. 126). Le facteur « complexité », ou « *complexity* »,

¹³ En anglais dans le texte : « the individual's internalization of the reference group's subjective culture, and specific interpersonal agreements that the individual has made with others, in specific social situations » (Thompson et al., 1991, p. 126)

est défini comme « la mesure dans laquelle une innovation est perçue comme relativement difficile à comprendre et à utiliser¹⁴ » (Thompson et al. 1991, p. 128), celui-ci apparait comme l'inverse de la dimension « facilité d'usage » du modèle du TAM. Le facteur « compatibilité à la tâche », ou « *job-fit* », est défini comme « la mesure dans laquelle un individu pense que l'utilisation [d'une technologie] peut améliorer l'exécution de son travail¹⁵ » (Thompson et al. 1991, p. 129). Par sa définition, ce facteur est très similaire à l'utilité perçue issue du modèle du TAM. Le facteur « conséquences à long-terme », ou « *long-term consequences* », se définit comme la perception des « résultats qui ont des retombées dans le futur¹⁶ » de l'utilisation de la technologie (Thompson et al. 1991, p. 129). Le facteur « émotions liées à l'utilisation », ou « *affect towards use* » est défini par les auteurs comme « les sentiments de joie, d'exaltation, de plaisir, de dépression, de dégoût, de mécontentement ou de haine associés par un individu à un acte particulier¹⁷ » (Thompson et al. 1991, p. 127). Pour finir, les auteurs ont utilisé le facteur « conditions facilitatrices », ou « *facilitating conditions* » tel que défini par Triandis (1980) selon laquelle les « facteurs objectifs, présents dans l'environnement, dont plusieurs juges ou observateurs peuvent convenir qu'ils rendent un acte facile à faire¹⁸ » (p.205). Le modèle propose des variables innovantes qu'ils conviendraient d'ajouter aux modèles de prédictions de l'intention comportementale vus précédemment.

Quelques années après la parution de ce modèle, des auteurs se sont intéressés à la confiance perçue et à son effet sur l'usage (Fogg & Tseng, 1999). La confiance perçue en un système se définit comme une croyance positive envers son honnêteté, sa bienveillance et sa compétence (Flavián et al., 2006). Dans ce cadre, l'honnêteté est la capacité du système à communiquer des informations vraies et de façon transparente, la bienveillance est l'intention de tendre au bien-être de l'utilisateur, et la compétence est la capacité du système à avoir les

¹⁴ En anglais dans le texte : « the degree to which an innovation is perceived as relatively difficult to understand and use » (Thompson et al. 1991, p. 128)

¹⁵ En anglais dans le texte : « the extent to which an individual believes that using [a technology] can enhance the performance of his or her job » (Thompson et al. 1991, p. 129)

¹⁶ En anglais dans le texte : « outcomes that have a pay-off in the future » (Thompson et al. 1991, p. 129)

¹⁷ En anglais dans le texte : « feelings of joy, elation, or pleasure, or depression, disgust, displeasure, or hate associated by an individual with a particular act » (Thompson et al. 1991, p. 127)

¹⁸ En anglais dans le texte : « objective factors, 'out there' in the environment, that several judges or observers can agree make an act easy to do » (Triandis, 1980, p. 205)

ressources informationnelles nécessaires pour satisfaire l'utilisateur (Flavián et al., 2006, p. 3). Plusieurs études ont démontré que la confiance perçue est un facteur prédictif des variables de la TAM et de l'intention d'usage (Jarvenpaa et al., 2000 ; Pavlou, 2003 dans Martin, 2018).

Dans cette optique d'unification des modèles précédents, Venkatesh et al. (2003) proposent un nouveau modèle synthétisant les modèles prédictifs des usages : la Théorie Unifiée de l'Acceptation et de l'Utilisation de la Technologie (UTAUT). Les auteurs se sont appuyés sur de nombreux modèles (TAR, TCP, TAM, Modèle de l'utilisation du PC, etc.) et études pour tester plusieurs variables dont quatre sont ressorties comme ayant un effet positif sur l'intention comportementale. Ces quatre facteurs influencent significativement l'intention d'utilisation et/ou l'utilisation d'une technologie (Cf. Figure 9).

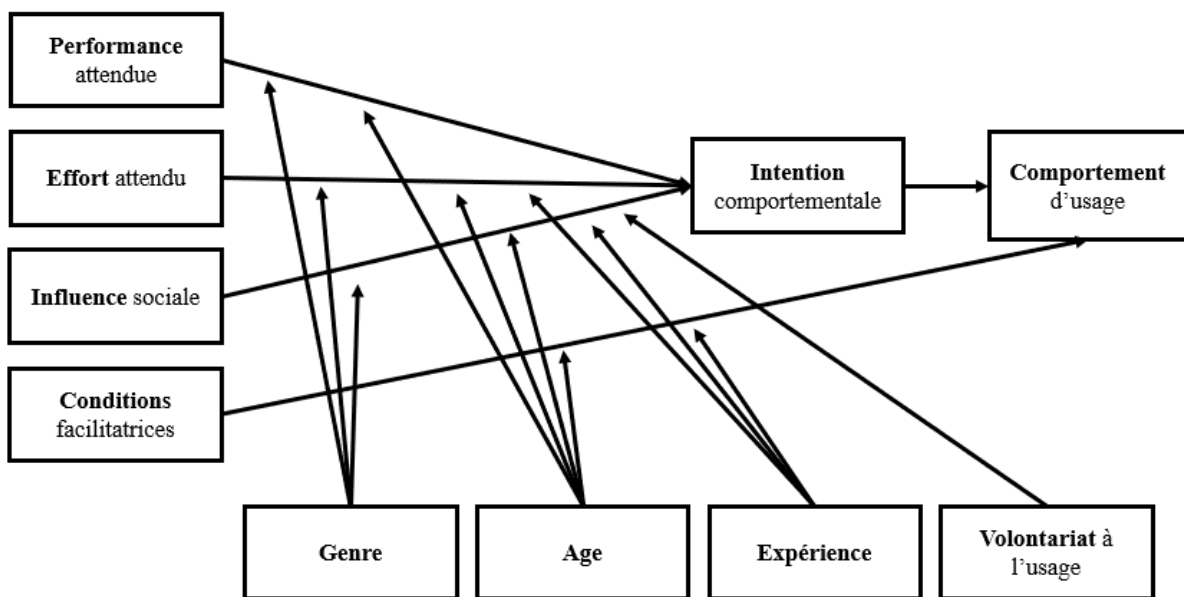


Figure 9. Modèle de l'UTAUT (Venkatesh et al., 2003)

Parmi ces facteurs, on retrouve les « performances attendues » (utilité perçue), ou « *Performance expectancy* » que l'auteur « définit comme le degré avec lequel un individu croit que l'utilisation du système l'aidera à améliorer ses performances professionnelles¹⁹ » (Venkatesh et al., 2003, p. 447). Cette définition semble identique à la définition de l'utilité perçue du modèle du TAM. Nous considérons qu'il s'agit de la même dimension. Les efforts attendus, ou « effort expectancy » sont un autre prédicteur qui « est défini comme le degré de

¹⁹ En anglais dans le texte : « is defined as the degree to which an individual believes that using the system will help him or her to attain gains in job performance » (Venkatesh et al., 2003, p.447)

facilité associée à l'utilisation du système²⁰ » (Venkatesh et al., 2003, p. 450). De la même manière, cette définition est identique à la définition de la facilité d'utilisation du modèle du TAM. Nous les considérons comme la même dimension. Dans l'UTAUT, l'« influence sociale », ou « *social influence* » est également un facteur prédictif. Il s'agit du « degré auquel un individu perçoit que des personnes importantes pensent qu'il ou elle devrait utiliser le nouveau système²¹ » (Venkatesh et al., 2003, p. 451). Les conditions facilitatrices sont également prédictives de l'usage. L'auteur les définit comme « le degré avec lequel une personne pense qu'il existe une infrastructure organisationnelle et technique pour soutenir l'utilisation du système²² » (Venkatesh et al., 2003, p. 453). Tous ces différents facteurs ont prédit 56% de l'intention comportementale et 40% de l'utilisation d'applications mobiles sur smartphones de 1512 participants lors d'une expérience (Venkatesh et al., 2012). Les attentes de performances (ou utilité perçue) sont la variable prédictive la plus efficace de l'intention d'usage (Venkatesh et al., 2003). De plus, les attentes d'effort (ou la facilité d'utilisation) ainsi que l'influence sociale ont un effet positif et significatif sur l'intention comportementale. Ces résultats ont été obtenus grâce aux réponses à un questionnaire créé pour mesurer les quatre facteurs et reposant sur des échelles validées par des études antérieures. L'auteur a également testé l'influence de variables modératrices sur les différents effets qui ont été identifiés. Quatre variables modératrices ont été testées : le genre, l'âge, l'expérience (sur la tâche) et le volontarisme à l'usage. Les résultats permettent de mettre en évidence que l'âge module l'effet que les quatre facteurs ont sur l'intention d'usage. Un jeune âge augmente l'effet de l'attente de performance sur l'intention comportementale et un âge plus avancé augmente l'effet de l'attente d'effort sur l'intention comportementale (Venkatesh et al., 2003). Le genre module l'effet que l'attente de performance, l'attente d'effort et l'influence sociale ont sur l'intention comportementale avec une influence positive du genre masculin. De sorte que le genre masculin augmente l'effet qu'a l'attente de performance sur l'intention comportementale et le genre féminin augmente l'effet qu'a l'attente d'effort sur l'intention comportementale. L'expérience

²⁰ En anglais dans le texte : « effort expectancy is defined as the degree of ease associated with the use of the system » (Venkatesh et al., 2003, p.450)

²¹ En anglais dans le texte : « the degree to which an individual perceives that important others believe he or she should use the new system » (Venkatesh et al., 2003, p. 451)

²² En anglais dans le texte : « the degree to which an individual believes that an organizational and technical infrastructure exists to support use of the system » (Venkatesh et al., 2003, p. 453)

module l'effet que l'attente d'effort, l'influence sociale et les conditions facilitatrices ont sur l'intention d'usage, de telle sorte qu'une grande expérience diminue l'effet que l'attente d'effort a sur l'intention comportementale. Le volontarisme à l'usage module l'effet que l'influence sociale a sur l'intention comportementale. Plus tard, une méta-analyse (Dwivedi et al., 2011), a révélé que la plupart des prédictions en termes d'effets du modèle de l'UTAUT étaient justes (Cf. Figure 10 présentant le modèle configuré en fonction des résultats obtenus grâce à cette méta-analyse).

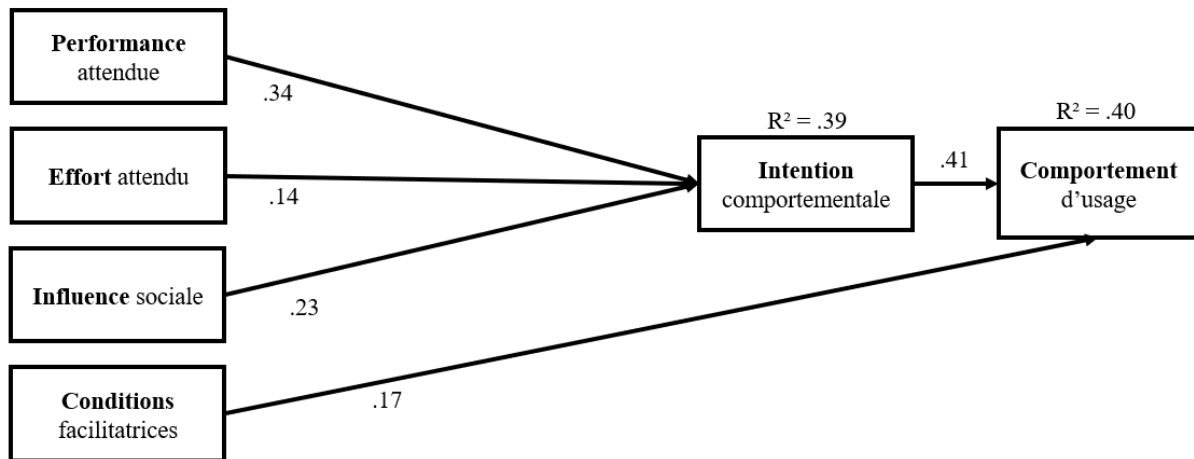


Figure 10. Coefficients bêta moyens des variables issues de la méta-analyse sur l'UTAUT (Dwivedi et al., 2011)

Venkatesh et al. (2012) ont ensuite complété le modèle originel par l'analyse de pattern dans plus de 500 articles traitant de l'adoption des technologies, en ajoutant trois variables indépendantes : la motivation hédonique, la valeur pécuniaire et les habitudes de l'utilisateur. La « motivation hédonique » (également nommé plaisir perçu), ou « *hedonic motivation* » est définie comme « le plaisir que procure l'utilisation d'une technologie²³ » (Venkatesh et al., 2012, p. 161). La valeur pécuniaire, ou « *price value* » est la valeur monétaire associée à l'utilisation de la technologie (Venkatesh et al., 2012). Et enfin, l'habitude, ou « habit » est définie comme « une construction perceptuelle qui reflète les résultats d'expériences

²³ En anglais dans le texte : « the fun or pleasure derived from using a technology » (Venkatesh et al., 2012, p. 161)

antérieures²⁴ » (Venkatesh et al., 2012, p. 161). Fort de l'ajout de ces nouvelles variables, les auteurs ont pu améliorer l'UTAUT et ainsi créé l'UTAUT2 (Cf. Figure 11).

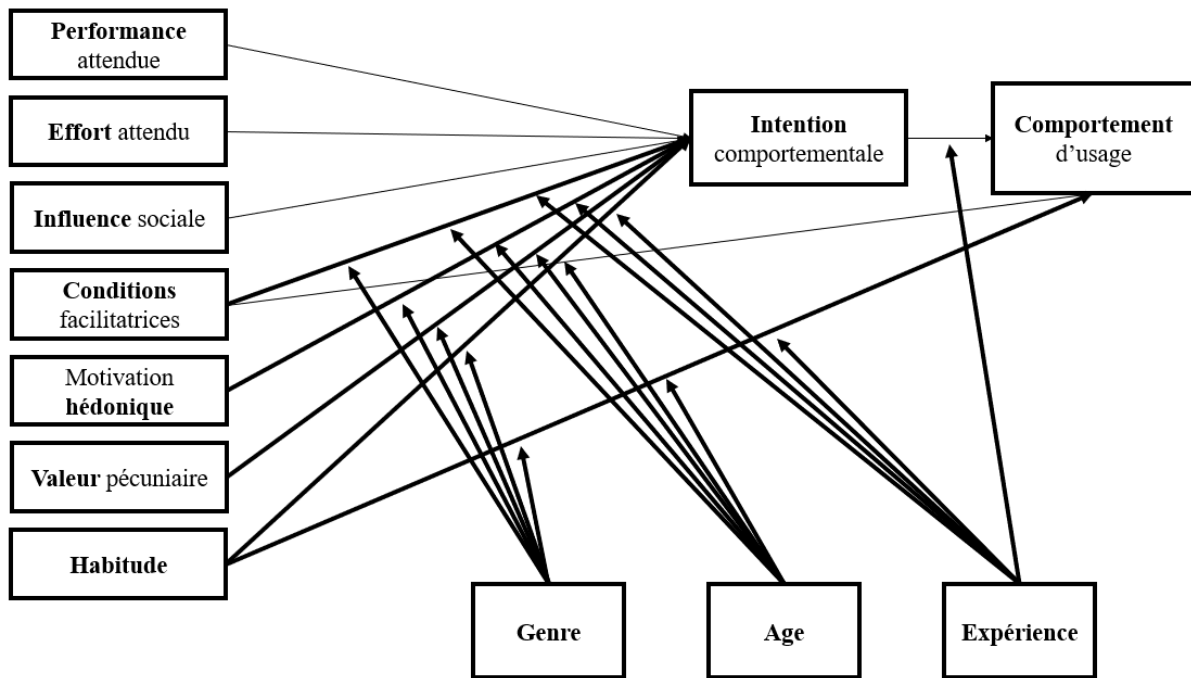


Figure 11. UTAUT2 (Venkatesh et al., 2012)

L'UTAUT2 prédit 74% de l'intention comportementale et 52% de l'usage d'application mobile de 1512 participants (Venkatesh et al., 2012). Dans ce nouveau modèle, le plaisir perçu est fortement prédictif de l'intention comportementale. Aussi, l'effet du prix s'est révélé significatif. Et enfin, les habitudes de l'utilisateur semblent avoir un impact sur son intention comportementale et son comportement d'usage.

²⁴ En anglais dans le texte : « a perceptual construct that reflects the results of prior experiences » (Venkatesh et al., 2012, p. 161)

1.5. Synthèse du chapitre

L'acceptabilité est une attitude se situant sur un continuum entre favorable et défavorable vis-à-vis d'une nouvelle technologie. L'étude de l'acceptabilité a pour finalité de mieux comprendre les dimensions influençant l'usage de la technologie en question. Les premières études essayant de prédire le choix d'effectuer un comportement ont pu mettre en lumière que l'intention d'usage était fortement prédictrice de l'usage réel (Fishbein & Ajzen, 1975). Les mêmes auteurs ont également pu identifier deux déterminants de l'intention comportementale : l'attitude envers le comportement et la perception des normes subjectives. Par la suite, le contrôle comportemental a été ajouté comme autre déterminants (Ajzen, 1991). Plus tard, des auteurs ont repris ces premiers travaux pour construire des modèles d'acceptabilité des technologies. Le TAM est le premier avec la mise en évidence de la facilité d'utilisation perçue et l'utilité perçue comme déterminants de l'attitude envers l'usage, elle-même déterminante de l'intention d'usage (Davis et al., 1989). Ce modèle a été repris de nombreuses fois afin d'y ajouter de plus en plus de déterminants pour comprendre avec de plus en plus de précision comment prédire l'usage effectif de la technologie. Le dernier modèle, l'UTAUT2, prédit plus de 50% de l'usage réel dans l'étude des auteurs du modèle (Venkatesh et al., 2012).

L'étude de l'acceptabilité, bien qu'informatrice, possède néanmoins de nombreuses limites. En effet, celle-ci part du principe que les comportements sont directement liés à l'intention. Certains auteurs, dont Bobillier Chaumon (2016), argumentent au contraire que c'est la situation qui détermine et oriente les choix de comportements. Selon ces modèles, les technologies étudiées sont perçues comme figées dans le temps avec peu de possibilité d'interactions entre les objets présents dans le système. Il n'y a aussi pas d'évaluation de la technologie a posteriori de son implémentation. C'est ce que propose le modèle de l'acceptation située de Bobillier Chaumon (2013) qui sera présenté plus tard dans cette partie théorique. Les modèles de l'acceptabilité s'intéressent à prédire l'usage réel mais pas à prédire les conséquences de cet usage. Pour ceci, les modèles de l'Expérience Utilisateur sont utilisés. Ils seront présentés dans la partie suivante.

Chapitre 2 : L'expérience utilisateur (UX)²⁵

Traditionnellement, les études sur l'acceptabilité et sur l'UX sont traitées comme étant distinctes alors qu'elles éclairent des dimensions différentes d'un même objet de recherche (Barcenilla & Bastien, 2009) ; elles peuvent donc s'enrichir les unes des autres. La différence entre les deux types d'étude est que les auteurs étudiant l'UX replacent l'utilisateur final au centre des préoccupations afin de mieux appréhender la relation humain / interface (Hassenzahl, 2008). Ce concept d'UX a été créé pour dépasser et apporter d'autres informations que celles données par les approches de l'acceptabilité (TAM, UTAUT) ainsi que celles sur la technologie et la tâche (facilité d'utilisation, utilité). Ce chapitre est constitué de trois sous-chapitres. Une définition est proposée en première partie afin de comprendre le concept d'UX. Ensuite, un modèle d'UX est explicité pour que la notion soit plus claire et que l'intérêt de l'étude des perceptions *a priori* soit souligné. Le chapitre est clos par une synthèse.

2.1. Définition de l'expérience utilisateur

L'UX est « une forme spécifique d'expérience humaine qui naît de l'interaction avec une technologie, un produit ou un service » (Lallemand, 2018, p. 31). D'autres auteurs ajoutent à cette définition une dimension temporelle ; l'UX serait alors « un sentiment momentané, principalement d'évaluation (bon-mauvais) lors de l'interaction avec un produit ou un service produit ou service²⁶ » (Hassenzahl, 2008, p. 12). Ce concept est né de l'intérêt grandissant des chercheurs et des professionnels pour la « conception centrée utilisateur ». Norman et Draper (1986) mettent en avant l'importance de l'analyse de l'activité ainsi que l'intégration des utilisateurs dès la conception (Lallemand, 2018). Quelques années après la publication de l'ouvrage de Norman et Draper, une nouvelle norme ISO 13 407 est publiée. Elle propose un guide pour mettre en place un processus de conception centrée sur l'utilisateur afin de créer des systèmes utilisables. C'est l'apparition du concept d'utilisabilité. Celui-ci est défini par la norme ISO 9 241-11 comme le « degré selon lequel un produit peut être utilisé par des

²⁵ « *User eXperience* » en anglais

²⁶ En anglais dans le texte : « *a momentary, primarily evaluative feeling (good-bad) while interacting with a product or service* » (Hassenzahl, 2008, p. 12)

utilisateurs identifiés pour atteindre des buts définis, avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié » (2019, p. 4).

Le terme d'UX a été utilisé par Norman (1990) pour la première fois. Le but de l'auteur était d'avoir une approche plus holistique afin de rendre compte de toutes les dimensions de l'UX (Martin, 2018). En effet, selon certains auteurs, tous les aspects de l'expérience sont à étudier. C'est pour cela qu'Alben (1996) définit l'UX comme « tous les aspects liés à la manière dont les gens utilisent un produit interactif : la sensation du produit dans leur mains, la compréhension de son fonctionnement, le ressenti durant l'usage, l'accomplissement de leurs buts mais également son adéquation avec le contexte global dans lequel ils l'utilisent²⁷ » (p.1). La norme 13 407 sera révisée à plusieurs reprises et la notion d'UX y apparaîtra dès la première révision (ISO 9241-210) afin d'être alignée à la recherche et au monde professionnel. Cette révision de norme définit l'UX comme les « perceptions et réactions d'une personne qui résultent de l'utilisation effective et/ou anticipée d'un produit, système ou service » (Organisation internationale de normalisation, 2019, p. 4). Toujours selon cette norme, l'UX inclut les « émotions, convictions, préférences, perceptions, confort, comportements et réalisations de ce dernier qui interviennent avant, pendant et après l'utilisation » (Organisation internationale de normalisation, 2019, p. 4). Selon les auteurs de cette norme, l'UX est une « conséquence de l'image de marque, de la présentation, de la fonctionnalité, des performances, du comportement interactif et des capacités d'assistance d'un système, produit ou service. Elle résulte également de l'état intérieur et physique de l'utilisateur résultant d'expériences passées, de ses attitudes de ses compétences, de ses capacités et de sa personnalité, ainsi que du contexte d'utilisation » (Organisation internationale de normalisation, 2019, p. 4). Beaucoup d'autres définitions n'ont pas été présentées du fait de leur grand nombre, mais la plupart des auteurs s'accordent sur le fait que l'UX est le résultat de l'interaction entre trois éléments : l'utilisateur, le système et le contexte (Martin, 2018).

L'UX est majoritairement étudié avec une approche multidimensionnelle visant à identifier les différents facteurs jouant un rôle dans l'interaction humain / système. Les modèles en découlant sont présentés dans la partie suivante.

²⁷ En anglais dans le texte : « all the aspects of how people use a product: the way it feels in their hands, how well they understand how it works, how they feel about it while they're using it, how well it serves their purposes, and how well it fits into the entire context in which they are using it. » (Alben, 1996, p. 1)

2.2. Modèles de l'expérience utilisateur

Le premier modèle traitant spécifiquement de l'UX est celui de Hassenzahl (2004). Selon celui-ci, la perception du système est différente de celle de l'utilisateur. Le concepteur est à l'origine du cadre « caractéristiques du produit » (Cf. Figure 12), il crée son système en y plaçant des caractéristiques à destination du futur utilisateur (Lallemand, 2018).

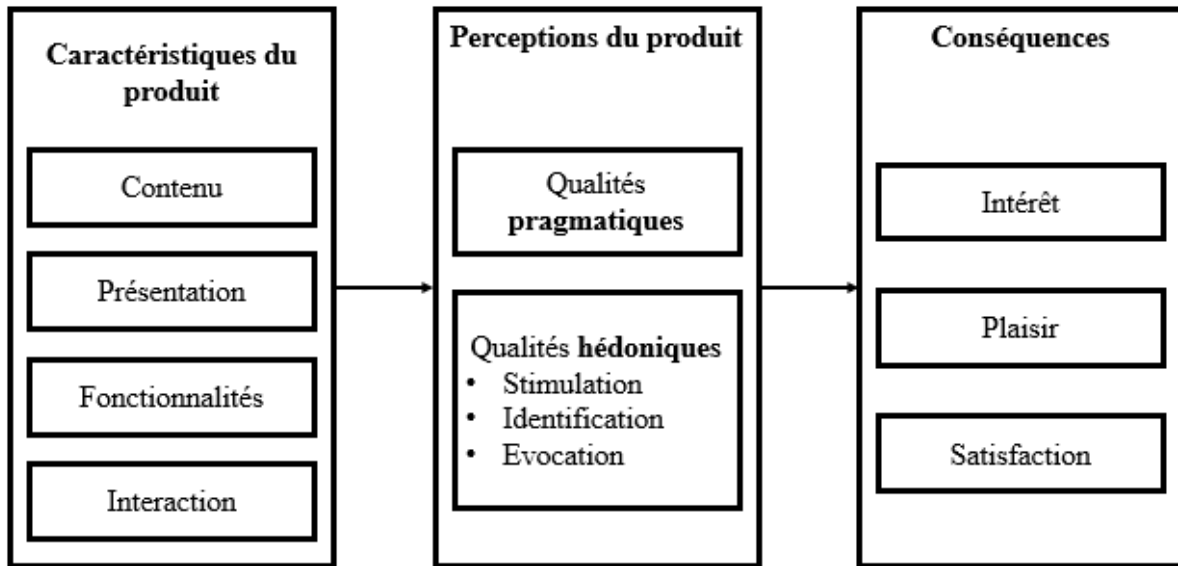


Figure 12. Modèle de l'UX de Hassenzahl (2003)

Selon l'auteur du modèle, les utilisateurs perçoivent le système à utiliser selon deux composantes distinctes : les qualités pragmatiques et les qualités hédoniques. Les qualités pragmatiques « se réfèrent à la capacité perçue du produit à soutenir la réalisation des objectifs "de faire"²⁸ » (Hassenzahl, 2008, p. 12). Les objectifs que l'utilisateur poursuit sont alors concrets : réaliser la tâche. Ce type de qualités font donc directement référence au système en question et à sa capacité à être utilisable et utile selon la perception de l'utilisateur. Ici, on retrouve les modèles de l'acceptabilité qui font l'emphasis sur l'utilité perçue et la facilité d'utilisation perçue. Selon Hassenzahl (2008), face aux qualités pragmatiques, il y a les qualités dites « hédoniques ». Ces qualités se réfèrent « à la capacité perçue du produit à favoriser la

²⁸ En anglais dans le texte : « Pragmatic quality refers to the product's perceived ability to support the achievement of "do-goals" » (Hassenzahl, 2008, p. 12)

réalisation des objectifs "d'être"²⁹ » (Hassenzahl, 2008, p. 12). Les objectifs en question ici sont des objectifs liés à l'utilisateur lui-même (être compétent, être socialement inséré, etc.). Les dimensions sous-tendant les qualités hédoniques seraient de trois types : identification, évocation et stimulation (Hassenzahl, 2004). L'identification réfère au besoin de s'exprimer au travers du système, l'évocation correspond à la capacité du système à rappeler des souvenirs et des symboles et la stimulation se réfère au besoin de challenge de l'utilisateur (Martin, 2018). Dans ce modèle, deux qualités du système sont donc évaluées dans l'UX : la qualité du système à aider à la réalisation de la tâche pour laquelle on l'utilise, et sa qualité à aider l'utilisateur à se réaliser lui-même. Également, selon les auteurs, c'est le contenu du système, sa présentation, ses fonctionnalités et son interactivité qui vont avoir un effet sur la perception des qualités du système (Hassenzahl, 2003). Les conséquences de ces perceptions vont influencer l'intérêt, le plaisir et la satisfaction que l'utilisateur va retirer du système.

Ce modèle est intéressant mais ne prend pas en compte les réactions émotionnelles des utilisateurs. Pour pallier ce manque, d'autres auteurs se sont intéressés à l'impact de l'interaction système / humain et de ses déterminants par le biais d'expérimentations (Mahlke & Thuring, 2007). En effet, les auteurs ont réalisé trois expériences durant lesquelles les participants devaient évaluer des interfaces à divers degrés d'utilisabilité. Dans cette étude, ainsi que dans beaucoup d'autres, l'utilisabilité est mesurée par des questionnaires se référant plutôt aux qualités fonctionnelles du système (Martin, 2018). En effet, on note une imbrication régulière du concept d'utilisabilité et du concept de facilité d'utilisation. Ceux-ci sont utilisés comme synonymes par certains auteurs (Hornbæk & Law, 2007). La première étude de Mahlke & Thuring (2007) a pu montrer que l'utilisabilité avait un impact sur les émotions des participants. En effet, l'interface très utilisable aboutissait à des émotions de valence positive et d'activation plus faible. La deuxième étude a montré que l'esthétisme avait également un impact sur les jugements des participants. Et enfin, la troisième étude a permis de mettre en avant les effets de l'esthétisme, et de l'utilisabilité sur les émotions et les perceptions des qualités instrumentales (ou pragmatiques) de l'interface (Mahlke & Thuring, 2007). Ces études ont permis de valider leur modèle : le modèle des composants de l'UX (Cf. Figure 13).

²⁹ En anglais dans le texte : « hedonic quality refers to the product's perceived ability to support the achievement of "begoes" » (Hassenzahl, 2008, p. 12)

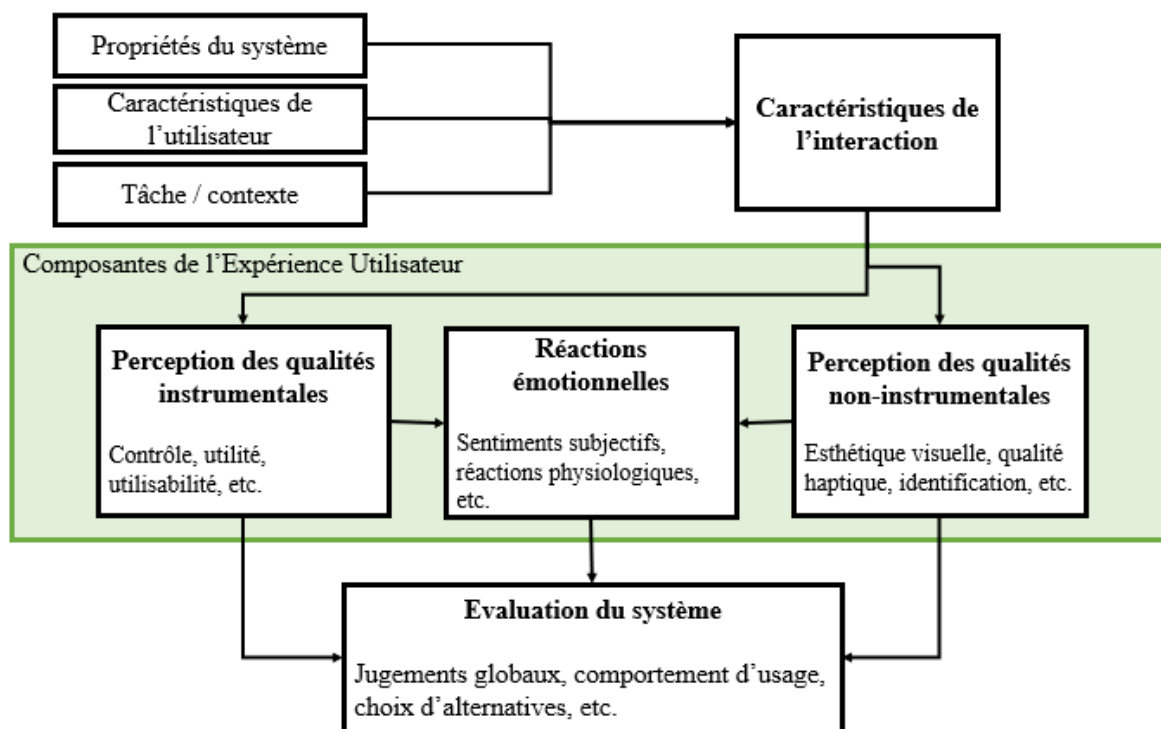


Figure 13. Modèle des Composantes de l'Expérience Utilisateur (CUE-model) de Mahlke et Thuring (2007)

Selon le CUE-model, les propriétés du système (les fonctionnalités, le design de l'interface), les caractéristiques de l'utilisateur (connaissances, compétences, etc.) et le contexte (la tâche à réaliser) influenceraient les caractéristiques de l'interaction. Ces caractéristiques, par le fait que l'utilisateur est constamment exposé à elles lors de l'interaction, vont modifier les perceptions qu'il a du système (Mahlke & Thuring, 2007). Les auteurs distinguent deux types de qualités, comparables aux qualités mises en avant dans le modèle de Hassenzahl (2004). Les premières qualités définies par les auteurs sont les qualités instrumentales qui « concernent la quantité expérimentée de support fourni par le système et la facilité de son utilisation³⁰ » (Mahlke & Thuring, 2007, p. 916). L'utilisabilité du système entre dans cette catégorie. Les autres qualités sont dites « non-instrumentales » et elles « concernent l'apparence et les sensations données par le système³¹ » (Mahlke & Thuring, 2007, p. 916). Les qualités

³⁰ En anglais dans le texte : « Instrumental qualities concern the experienced amount of support the system provides and the ease of its use » (Mahlke & Thuring, 2007, p. 916)

³¹ En anglais : « Non-instrumental qualities, on the other hand, concern the look and feel of the system » (Mahlke & Thuring, 2007, p. 916)

esthétiques et haptiques rentrent notamment dans cette catégorie. Selon les auteurs, ces deux types de qualités vont provoquer des réactions émotionnelles. Ce sont de ces réactions émotionnelles que va découler l'évaluation du système. Selon ce modèle, les émotions sont définies comme une composante de l'UX et non comme une conséquence.

Ce modèle, plus complet que les précédents, reste théorique. Plus tard, des auteurs ont créé à partir de celui-ci le meCUE questionnaire (Minge & Riedel, 2013). Ce questionnaire a été validé dans plusieurs études différentes : une en laboratoire (n=67) et deux enquêtes en ligne (n=238). Cependant, le questionnaire qui a permis de tester le meCUE a été traduit et utilisé par une équipe de chercheurs français qui n'ont pas pu le valider (Lallemand & Koenig, 2017). En effet, les questions étaient perçues comme absurdes par de nombreux participants. De plus, les analyses statistiques n'ont pas été concluantes. Pour toutes ces raisons, les auteurs de la version française considèrent que l'échelle n'est pas convenable pour évaluer l'UX de systèmes conçus pour le travail (Lallemand & Koenig, 2017).

L'inadéquation des modèles UX pour expliquer l'interaction humain / système au travail est explicable : ces modèles ont été créés pour identifier ce qui est acceptable ou pas dans l'interface du système, contrairement aux modèles d'acceptabilité, qui ont été créés pour comprendre les perceptions des humains face au système ainsi qu'à leur intention de l'utiliser. Afin de rassembler ces deux approches pour évaluer plus globalement l'UX, des auteurs ont proposé des modèles intégrés de l'UX et de l'acceptabilité (Février, 2011; Schaik & Ling, 2011).

L'évaluation de l'UX peut être réalisée par différentes méthodes (e.g. questionnaire, entretiens). La méthode qui permet d'obtenir le plus d'informations sur l'interaction humain/machine est le test utilisateur. Cette méthode est expliquée dans la partie suivante.

2.3. Tests Utilisateurs

Le Test Utilisateur (TU) est une méthode efficace pour appréhender les composantes et les résultats d'une interaction humain/machine. En effet, elle est la méthode la plus directe car elle est basée sur l'observation des utilisateurs. Cette méthode « consiste à mettre en situation l'utilisateur afin d'observer ses comportements, ses réactions et sa performance dans la réalisation de tâches, généralement prédéfinies » (Lallemand, 2018, p. 665). Celui-ci réalise des tâches (simulation des tâches qui auront réellement lieu) en collaboration avec cette technologie. Ils peuvent se réaliser à deux, c'est-à-dire que deux utilisateurs collaborent pour effectuer les scénarios du TU (Grondin et al., 2002). Les TUs sont riches en informations car

ils permettent de comprendre comment l'utilisateur interagit et comprend la technologie qu'il a devant lui. « Les comportements de ces derniers (les utilisateurs) sont souvent imprévisibles : c'est en les observant, sans interférer, qu'il est possible d'identifier les difficultés d'interaction et d'analyser si les systèmes offrent une expérience positive ou non » » (Lallemand, 2018, p. 667). A la suite des TUs, l'expérimentateur permet à l'utilisateur d'exprimer ce qu'il a ressenti et compris (Lallemand, 2018). Cet entretien est important car il est parfois difficile de comprendre pourquoi l'utilisateur a fait ce qu'il a fait, ceci permet donc de contextualiser les décisions et les manières de faire de l'utilisateur. Les données recueillies grâce aux TUs sont essentielles pour améliorer la technologie de façon itérative.

Il semble que les TU ont été utilisés pour la première fois dans le cadre du développement des tableaux de bord des avions américains lors de la seconde guerre mondiale (Chapanis, 1953). Les auteurs ont amélioré les interfaces des tableaux de bord qui avaient tendance à provoquer de nombreuses erreurs du fait de leur complexité. Différents prototypes ont été testés auprès des pilotes et les chercheurs ont recueilli le pourcentage d'erreurs pour chacun d'entre eux afin de recommander le plus efficient. Depuis, des TUs sont utilisés pour l'immense majorité des interfaces car ils permettent d'identifier les freins que les concepteurs n'auraient pas imaginés (Lallemand, 2018). L'objectif est de confronter l'utilisateur à la technologie afin de l'améliorer. Au début de leur utilisation, les TUs étaient centrés sur l'évaluation de l'utilisabilité des technologies en se concentrant sur la mesure de l'efficacité, l'efficience et la satisfaction des utilisateurs (Maguire, 2001). Petit à petit, les chercheurs ont commencé à s'intéresser à l'ensemble des composantes de l'interaction (e.g. les émotions, les perceptions).

Les TUs sont réalisés soit en contexte contrôlé dans le cadre de la conception d'une technologie en développement, soit en contexte réel avec une technologie prête à être mise à disposition de ses futurs utilisateurs. Cette méthode « présente l'avantage de permettre une confrontation de l'outil en cours de conception aux utilisateurs [...] et de mesurer les opinions, les attitudes et les performances de ces derniers avec l'outil concerné » (Loup-Escande et al., 2013, p. 5). Elle s'inscrit dans un processus itératif, elle peut être appliquée au début du projet sur des maquettes autant qu'après l'implémentation technologique sur un système robuste. Il permet de favoriser une « amélioration continue du système, tout au long du cycle de développement, en révélant une grande partie des problèmes d'utilisation » (Lallemand, 2018, p. 667).

Lallemand (2018) trouve à cette méthode de nombreux avantages. Elle permet de recueillir de nombreuses informations sur les performances, les perceptions et les réactions des

utilisateurs face au système évalué, ce qui permet de révéler une grande partie des problèmes d'utilisation et de conception. Les données obtenues grâce aux TUs permettent de concevoir facilement des recommandations car chaque amélioration est étayée par une expérience d'interaction avec le système. Et c'est une méthode qui permet autant le recueil de données qualitatives que quantitatives.

Cependant, les TUs présentent aussi des limites (Lallemand, 2018). Ils sont chronophages pour les concepteurs et ne peuvent pas permettre d'appréhender l'entièreté d'un système, des choix sont à faire quant aux scénarios utilisés. Ces scénarios peuvent être trop artificiels, c'est-à-dire loin de la réalité, particulièrement si la technologie n'est pas très aboutie.

Dans le cadre de la cobotique, les TUs sont très adaptés. En effet, ils permettent d'observer les comportements des utilisateurs avant même que la technologie ne soit totalement aboutie. Pour notre étude, ceci est essentiel. En effet, les cobots, pour la plupart, ne sont pas totalement adaptés pour opérer sur le terrain. Il convient alors de tester leurs capacités auprès des utilisateurs dans un environnement contrôlé afin de concevoir les directives à appliquer pour que les cobots puissent être mis en place en situations de travail en apportant un réel bénéfice aux opérateurs.

Le concept de l'UX, les modèles qui en ont découlé et les tests utilisateurs sont synthétisés dans la partie suivante.

2.4. Synthèse du chapitre

Le concept de l'Expérience Utilisateur (ou UX) a été créé afin de s'affranchir de la seule évaluation du système et des perceptions des futurs utilisateurs. Le but était de replacer l'utilisateur au centre et d'étudier son interaction avec le système. L'UX est l'expérience humaine de l'interaction avec un système. Cette expérience résulte en une évaluation du système que les chercheurs vont exploiter. Le premier modèle de l'UX décrit la construction de cette évaluation (Hassenzahl, 2004). Selon ce modèle, les caractéristiques du système (contenu, fonctionnalité, etc.) vont influencer les perceptions des qualités pragmatiques (utilisabilité, utilité, etc.) et des qualités hédoniques (stimulation, identification et évocation) que l'utilisateur a du système. Ces perceptions vont par la suite influencer les conséquences de cette interaction sous forme de degré d'intérêt, de plaisir perçu et de satisfaction de l'utilisateur. A la suite de ce modèle, un autre modèle a été construit, prenant en compte les émotions comme faisant à la fois partie des composantes de l'UX et également des résultats de l'interaction. Ce modèle a comme postulat que c'est la réaction émotionnelle provoquée par l'interaction qui va créer des conséquences sur l'évaluation du système et le choix de son usage par l'utilisateur. Des tentatives ont été faites pour unifier les modèles de l'UX ainsi que les modèles de l'acceptabilité. Cependant, ces modèles restent théoriques, peu d'études ont été réalisées pour les valider à travers l'utilisation d'un questionnaire. Lorsque cela a été fait, des résultats contradictoires ont pu être observés. Il semble que ces modèles soient difficilement applicables au monde du travail. Pour tester l'UX qui découle de l'interaction entre les utilisateurs et la technologie, les Tests Utilisateurs (TU) sont particulièrement adaptés. Ils consistent à mettre en situation d'interaction l'utilisateur avec la technologie afin qu'il réalise différents scénarios (proche des situations d'usage réel). Les TUs permettent de recueillir de précieuses informations (e.g. le comportement, les réactions émotionnelles) qui vont aider à l'identification de recommandations pour améliorer l'UX.

Toutes ces variables précédemment citées sont-elles suffisantes pour prédire de manière infaillible l'adoption d'une technologie ? Cela n'est pas garanti... En effet, à notre connaissance, aucune étude n'a pu mesurer les intentions comportementales d'opérateurs avant l'implémentation d'une nouvelle technologie sur leur poste de travail ni n'a observé l'usage réel de cette même technologie dans le quotidien des travailleurs. Les modèles présentés ne s'intéressent qu'aux perceptions de la personne avant, pendant et immédiatement après l'usage. Il convient donc de s'intéresser également à l'appropriation de la technologie sur le lieu de

travail. Qu'empêche-t-elle de faire ? Comment modifie-t-elle le travail de l'opérateur ? Que permet-elle de faire de nouveau ? La prochaine partie présentera un modèle qui vise à observer l'acceptation réelle des opérateurs, en se situant directement sur le lieu de travail.

Chapitre 3 : L'acceptation située

Les différentes variables que nous avons pu voir dans la partie précédente ne permettent que de prédire une utilisation du système, pas une adoption. En effet, ces différents modèles n'apportent pas la garantie que le système va être incorporé de façon pérenne dans le quotidien de la personne et lui apporter plus qu'elle ne lui enlève. Pour pallier ce manque de « contexte », Bobillier Chaumon (2016) a proposé un modèle visant à prendre en compte l'environnement immédiat de l'utilisateur ainsi que ses dispositions vis-à-vis du système. Selon lui, « c'est bien l'usage (ie. les conditions d'utilisation de l'outil -collectives, organisationnelles...-, le projet et les expériences de l'usager, le système social dans lequel il est implémenté...) et pas seulement les caractéristiques intrinsèques de la technologie qui vont en déterminer les effets » (Bobillier Chaumon, 2013, p. 29). Pour l'auteur, adapter le système pour le rendre attractif à l'utilisation ne garantit pas que l'interaction de l'utilisateur avec le système sera toujours positive. Le but à poursuivre est, selon Bobillier Chaumon (2013), "de mieux appréhender les rapports structurants qui existent entre la technique et son contexte social d'implémentation" (p. 46). C'est pour cela qu'il importe de penser l'usage comme une collaboration étroite avec des feedbacks mutuels entre le système et l'opérateur. Dans ce sens, l'opérateur ne fait pas qu'utiliser le cobot, il fait progresser son usage en l'utilisant et le cobot fait progresser l'opérateur par son utilisation. Et dans toute collaboration, pour qu'elle soit optimale, il est nécessaire que la technologie cobotique soit pleinement acceptée par l'opérateur. Il est donc essentiel de tendre vers une acceptation sociale optimale de la technologie par les collaborateurs car elle « constitue l'étape initiale du processus d'adoption des technologies » (Bobillier Chaumon, 2013 p. 35). Sans elle, les opérateurs risquent de ne pas apprécier de travailler avec le cobot et de développer du stress (Pollak et al., 2020), ou alors de réguler leurs actions de sorte à ne pas avoir à utiliser la technologie. Il semble que favoriser l'appropriation du système par l'opérateur, c'est-à-dire permettre à l'opérateur de donner du sens à l'utilisation de ce système, soit essentiel pour optimiser une bonne coopération entre les deux. Par cela, l'opérateur a un véritable pouvoir d'action dans la situation, la relation créée « exprime la subjectivité des individus, c'est-à-dire la part de soi qui est mise dans l'usage des technologies pour les réinventer, les détourner et les ajuster à leur propre mode de fonctionnement ; mais aussi celle que l'on retire de cet usage pour son propre développement » (Bobillier Chaumon, 2013, p. 51). Lorsque l'usager s'approprie un dispositif technique, il lui donne du sens, il évalue la cohérence des propriétés du dispositif (facteurs internes, propres au dispositif) en les reliant à ce qui constitue son propre cadre de

référence (facteurs externes, propres à l'utilisateur et son contexte social d'usage). Il instrumentalise aussi la technologie à des fins stratégiques ou de développement personnel. Mais ce processus d'appropriation sert également à améliorer la situation de l'utilisateur et la technologie elle-même (Bobillier Chaumon, 2013, p. 56). Il faut que l'opérateur passe par une appropriation du cobot pour qu'il puisse l'accepter. L'auteur propose pour ceci de mesurer l'acceptation située du système qui est définie dans la prochaine partie. Le modèle de l'acceptation située est ensuite expliqué afin d'en comprendre les différentes composantes. Ce chapitre se clôt par une proposition d'articulation des différentes approches qui ont été présentées, suivie d'une synthèse.

3.1. Définition de l'acceptation située

Bobillier Chaumon (2016) propose l'étude d'une analyse située, qu'il définit comme « la mise à l'épreuve de la technologie dans son contexte d'usage qui permet d'évaluer concrètement ses apports et ses limites, et de définir ainsi son intérêt par rapport à l'activité et aux projets de l'individu » (Bobillier Chaumon, 2016, p. 8). Etudier l'acceptation permettrait d'identifier les blocages des opérateurs et les leviers qui permettraient une collaboration optimale (Bobillier Chaumon, 2016 ; Bobillier-Chaumon, 2013). Cette acceptation ne se base pas sur l'étude des intentions, mais sur l'étude de l'usage réel de la technologie. L'auteur a modélisé ce concept d'acceptation située afin de le rendre très facile d'étude et d'utilisation. Ce modèle est présenté dans la prochaine partie.

3.2. Le modèle de l'acceptation située

L'acceptation située possède quatre composantes guidant l'analyse sur le terrain (Cf. Figure 14). La première composante, la dimension **personnelle**, se réfère aux coûts cognitifs et émotionnels qu'implique l'utilisation de la technologie en question. Par exemple, un opérateur avait pour habitude d'effectuer la tâche seul (ex : visser des planches), maintenant il doit superviser la tâche réalisée par le robot en faisant attention de lui donner les bonnes instructions afin qu'il comprenne bien les gestes à effectuer. Dans ce cas-là, l'opérateur a réduit sa charge physique, mais peut augmenter sa charge mentale car il doit donner des instructions claires sans avoir le contrôle total sur les gestes effectués. La deuxième composante, la dimension **interpersonnelle**, se réfère aux impacts de la technologie utilisée sur le collectif. Par exemple, deux opérateurs devaient réaliser une tâche de portage ensemble, leur collectif de travail était soudé.

Un cobot peut prendre le portage seul, les deux opérateurs effectuent d'autres tâches et supervisent le cobot en même temps. Leur dynamique de travail est totalement changée, il faut donc veiller à ce que les relations de travail ne diminuent pas en qualité. La troisième composante, la dimension **méta-personnelle** (organisationnelle), se réfère aux conséquences socio-organisationnelles qu'ont les technologies sur l'opérateur et son activité. Par exemple, un opérateur réalise des boîtiers numériques complets en 2 heures. Avec l'aide du cobot, ils réalisent ces boîtiers en 30 minutes. Cela entraînera inévitablement des changements organisationnels. Et la quatrième composante, la dimension **transpersonnelle** (professionnelle et identitaire), se réfère aux conséquences de l'utilisation de la technologie sur la construction identitaire de l'opérateur. Par exemple, un opérateur se percevait comme « manutentionnaire » du fait de la grande quantité de portage qu'il devait effectuer. Avec un collègue cobotique, il devient « superviseur de cobot ». La perception qu'il a de son travail et l'identité professionnelle qu'il a de lui-même s'en trouveront changés.

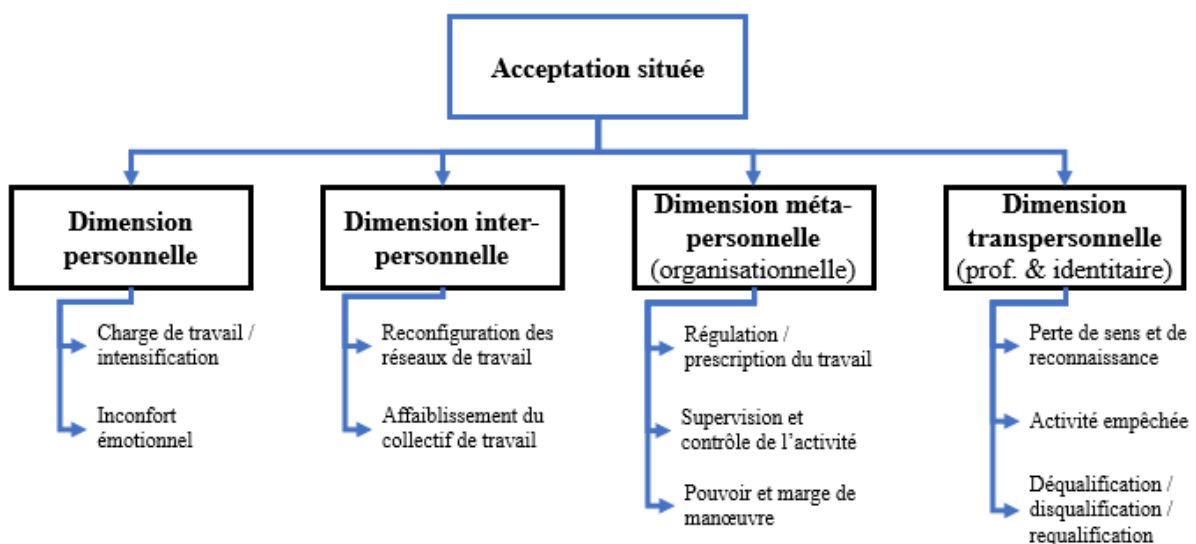


Figure 14. Synthèse des principales dimensions liées à l'acceptation située (Bobillier Chaumon, 2013, p. 156)

Nous avons pu voir différentes approches de l'analyse de l'acceptabilité et de l'acceptation de la technologie. Serait-il possible que ces approches puissent être rassemblées dans un seul modèle afin de comprendre comment elles s'articulent ? C'est ce que nous allons voir dans la prochaine partie.

3.3. Proposition d'articulation des différentes approches

Terrade et al. (2009) sont les premiers auteurs à proposer d'articuler les différentes approches de l'acceptabilité en soulignant l'importance de chacune d'entre elles. Ils notent qu'il existe trois phases dans l'étude de l'usage d'une technologie : l'acceptabilité a priori, l'acceptation et l'appropriation. Selon les auteurs, l'usage peut être étudié *a priori* quand la personne n'a pas encore utilisé la technologie. Dans ce cas, « l'acceptabilité porte sur la représentation subjective de l'usage de la technologie et les dimensions pertinentes à prendre en compte sont l'utilité perçue, l'utilisabilité perçue, les influences sociales supposées intervenir et les conditions supposées de déploiement de la technologie » (Terrade et al., 2009, p. 384). Ensuite, quand l'individu a pu utiliser au moins une fois la technologie, on peut mesurer son acceptation de celle-ci. L'étude de l'utilité et de l'utilisabilité seront très importantes à ce stade-là. Et pour finir, quand la technologie s'est implémentée dans « le fonctionnement ordinaire de vie », on doit s'interroger sur le degré d'appropriation réelle de la technologie par l'individu (Terrade et al., 2009, p. 385).

Par la suite, Bobillier Chaumon (2016) approfondit cette articulation. Selon l'auteur, de façon similaire à Terrade et al. (2009), trois approches sont à retenir dans l'étude de l'acceptabilité et de l'acceptation des nouvelles technologies au travail : l'acceptabilité pratique, l'acceptabilité sociale et l'acceptation située (Cf. Figure 15).

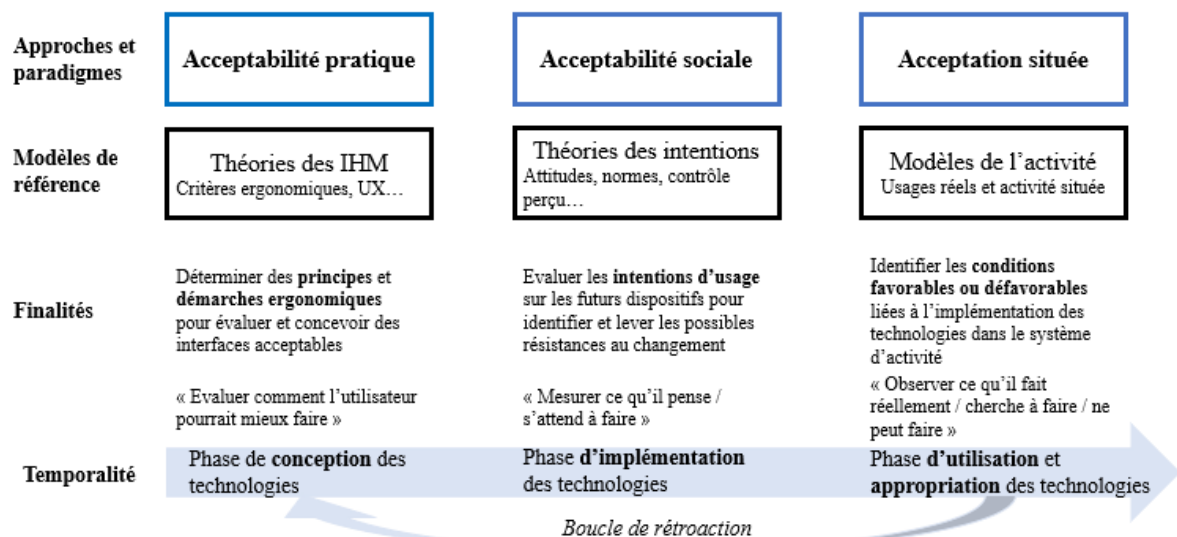


Figure 15. Proposition d'articulation entre les différentes approches (Bobillier Chaumon, 2016)

L'acceptabilité pratique vise à rendre l'interaction entre l'utilisateur et le système la plus optimale possible pour que celui-ci soit adapté (Bobillier Chaumon, 2016). Pour rendre ceci possible, on s'emploie à rendre le système utile et utilisable pendant la phase de conception en

prenant en compte les critères ergonomiques de référence. Cette phase concerne les théories d'Interaction Humain Machine (IHM) qui visent à créer des critères ergonomiques (Scapin & Bastien, 1997) et à modéliser l'UX pour aiguiller la conception d'une collaboration efficace. C'est la première étape qui a lieu pendant la conception de la technologie. Ensuite, il faudrait évaluer les perceptions des utilisateurs en se basant sur les théories des intentions que nous avons citées précédemment (Cf. Section 2, Chapitre 2). C'est ce que l'auteur nomme l'acceptabilité sociale (Bobillier Chaumon, 2016). Il s'agit de comprendre ce que perçoit l'utilisateur du système et l'effet que cette perception a sur son intention d'usage. Ce type d'acceptabilité est « un pronostic d'usage, une évaluation par anticipation fondée sur l'analyse des attitudes et des opinions des utilisateurs futurs, laissant présager un accueil favorable ou non à la technologie développée » (Bobillier Chaumon, 2016, p. 4). L'acceptation située, comme nous l'avons évoqué, se situe chronologiquement après, dans l'usage réel et non dans l'intention d'usage. Il s'agit de comprendre ce que la technologie soutient, ce qu'elle ajoute, ce qu'elle enlève en évaluant « comment le pouvoir d'agir de l'individu peut être contrarié, limité ou empêché » avec l'implémentation d'une technologie innovante (Bobillier Chaumon, 2016, p. 10).

3.4. Synthèse du chapitre

Afin de combler le manque d'intérêt porté à l'appropriation concrète, réelle et orientée du système par son utilisateur, certains auteurs formulent des propositions théoriques pour orienter notre regard de chercheur (e.g., Bobillier Chaumon, 2016 ; Terrade et al., 2009). Ainsi, Bobillier Chaumon (2016) propose le concept de l'acceptation située comme grille de lecture pour analyser l'impact des nouveaux systèmes technologiques sur les utilisateurs. Cette acceptation est définie comme une évaluation de la technologie dans le quotidien de l'opérateur l'utilisant. Selon l'auteur, elle est identifiable en interrogeant dans la situation réelle de travail ce qui est empêché et ce qui est amélioré grâce à ce système. Cette grille de lecture a été illustrée par le modèle de l'acceptation située. Ce modèle a quatre dimensions distinctes (personnelle, interpersonnelle, méta-personnelle et transpersonnelle) qui permettent d'analyser toutes les caractéristiques de la situation d'interaction et ses conséquences. Ce chapitre se clôt par une proposition d'articulation entre les différentes théories de l'acceptation et d'intention vues dans les chapitres précédents et l'acceptation située. En effet, selon Bobillier Chaumon (2016), il y a trois phases pour étudier l'acceptabilité et l'acceptation. La première phase, l'acceptabilité pratique, concerne les qualités propres au système et à lieu pendant la phase de conception. La seconde, l'acceptabilité sociale, concerne les perceptions des (futurs) utilisateurs et a lieu pendant la diffusion du système. La troisième, l'acceptation située, concerne les conséquences des modifications du travail dues au système et a lieu après la phase d'implémentation.

L'implémentation technologique mérite d'être investiguée et même suivie par les psychologues du travail et les ergonomes. En effet, les cobots sont implémentés dans un cadre de travail qui existe déjà avec des opérateurs qui sont déjà experts de leur tâche. Au sein de ce travail, beaucoup de variabilités poussent déjà l'opérateur à réguler sa tâche pour y faire face (Efros, 2015). Le cobot peut-il être une aide face à ces variabilités ? Ceci sera le thème de la troisième partie.

SECTION 3. LES VARIABILITES AU TRAVAIL

Pour introduire les différentes définitions des variabilités, nous proposons de nous appuyer sur deux protagonistes célèbres : Alice et la Reine Rouge, célèbres personnages du roman *De l'autre côté du miroir* de Lewis Carroll (1871). Dans cet ouvrage, un passage est particulièrement intéressant. Alice et la Reine Rouge courent et le paysage autour d'elles ne semble pas changer. Alice fait part de son étonnement à la Reine qui ne le comprend pas. Alice dit « Dans notre pays, [...] si l'on courait très vite, [...] on arrivait généralement quelque part, ailleurs. », la reine répond « Ici, [...] il faut courir de toute la vitesse de ses jambes pour simplement rester là où l'on est. Si l'on veut aller quelque part, ailleurs, il faut alors courir au moins deux fois plus vite " » (p. 33). Alice comprend alors que le paysage autour d'elles court aussi. Comme le sous-entend la Reine Rouge, tout notre environnement est en perpétuel mouvement (Cf. Figure 16). Il change et nous devons nous y adapter. Ce changement est notre réalité. C'est l'hypothèse de la reine rouge développée par Van Valen (1973), qui postule que chaque agent de la situation évolue à chaque instant, ce qui pousse les autres agents de cette même situation à évoluer à leur tour pour ne pas « être en retard ». L'évolution est constante et tout retard est un danger pour l'agent. Ceci est applicable dans toute situation, y compris les situations de travail.

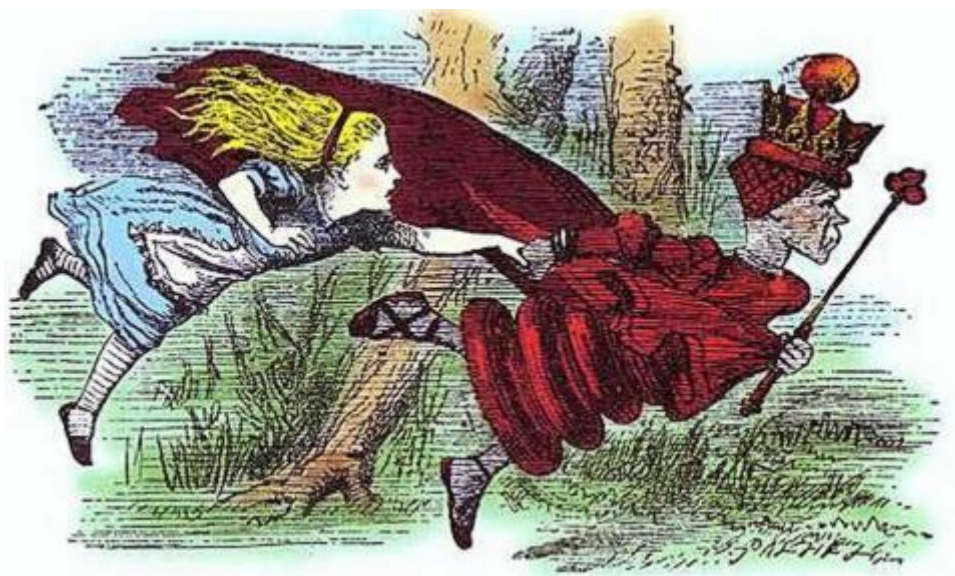


Figure 16. Illustration extraite du roman de Lewis Carroll (1871) représentant Alice et la Reine Rouge courant avec le paysage

Le premier chapitre présente la notion de variabilité ancrée dans l'étude de l'humain au travail. Le deuxième chapitre s'intéresse à l'étude de l'impact de ces variabilités dans le cadre d'un travail collaboratif entre humain et technologie robotique.

Chapitre 1. Modélisation des variabilités au travail

Chaque opérateur est un agent qui transforme sa situation de travail et cette situation de travail le transforme en retour, il doit s'adapter en permanence (Guérin et al., 2021). Nous avons pu comprendre qu'il est nécessaire que les cobots soient plus flexibles pour ne pas générer d'impact sur la santé et faire face aux aléas de la situation et aux particularités des opérateurs avec lesquels ils interagissent. Ainsi dans une démarche de conception, il est nécessaire de classer les aléas potentiels afin de pouvoir les prendre en compte. Ces aléas sont nommés « variabilités » en ergonomie (Guérin et al., 1997). De plus en plus d'études s'intéressent à cette notion (Cardoso et al., 2021 ; Gualtieri et al., 2021). En effet, une recherche sur la base de données Web of Science du terme « variabilité » montre que celui-ci n'a cessé d'augmenter (Cf. Figure 17).

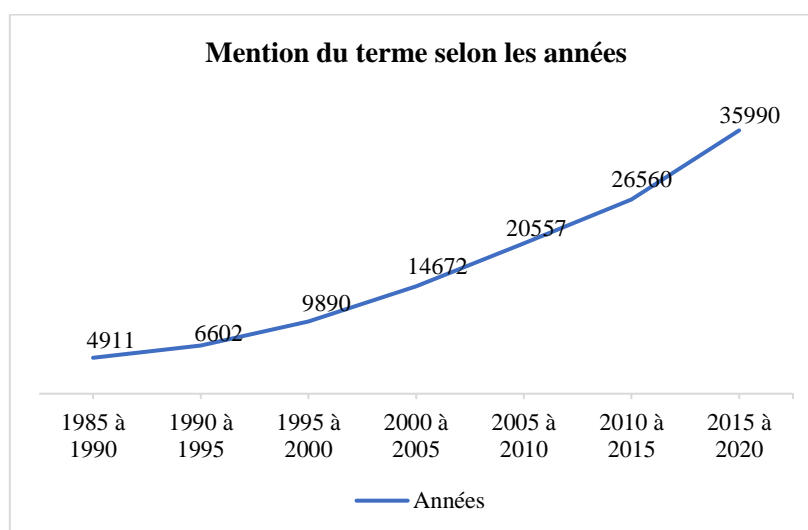


Figure 17. Nombre de mentions du terme « variabilité » dans les titres des publications issues de la base de données Web of Science de 1985 à 2020

Identifier les variabilités en situation de travail pourrait permettre de mieux les appréhender et d'analyser leurs impacts sur l'opérateur et/ou sur les process en entreprise. A partir de la caractérisation des variabilités, nous pouvons, dans un projet de conception de situation de travail visant l'introduction d'un cobot, tout en préservant santé et performance, chercher à catégoriser quelles variabilités sont essentielles et bénéfiques pour le contenu du

travail, lesquelles sont néfastes et pourraient être améliorées grâce à une implémentation technologique, et enfin lesquelles pourraient être améliorées par des améliorations socio-organisationnelles de la situation de travail. Cette caractérisation va permettre de créer une catégorisation des variabilités en situation de travail, un outil indispensable pour les intervenants psychologues et/ou ergonomes lorsqu'ils collaborent à des projets de cobotisation (Cf. Section 3, Chapitre 2).

Il s'agit d'analyser d'une part, comment l'introduction d'une technologie émergente (un cobot) peut être à l'origine de variabilités, ou comment l'adaptation du cobot à ces variabilités peut expliquer l'acceptation (une fois la technologie installée depuis un petit moment) et, d'autre part, l'acceptabilité (avant et juste après l'introduction de la technologie). Nous proposons donc un cadre intégratif favorisant le repérage des variabilités en amont de l'implémentation d'une technologie émergente afin de concevoir cette technologie pour en limiter les impacts négatifs sur la santé des opérateurs, mais aussi pour en favoriser l'acceptation. Nous faisons l'hypothèse qu'une bonne identification et prise en compte des variabilités par le système cobotique favorisera l'augmentation des effets positifs d'une ou de plusieurs dimensions de l'acceptation située.

Afin de permettre une meilleure identification de ces variabilités, il convient de les définir. La prochaine partie définit la notion de variabilité dans le cadre des modèles de l'activité. Ensuite, une synthèse du chapitre sera proposée.

1.1. Définition des variabilités dans le cadre des modèles de l'activité

Les variabilités sont les « variations auxquelles chaque situation est soumise » (Brangier & Valléry, 2021, p. 255). Ces variabilités peuvent être de plusieurs types : des variabilités intra-individuelles, qui sont des variations de l'état interne d'un individu, des variabilités inter-individuelles, qui sont des variations sur une même caractéristique entre plusieurs individus de la même situation de travail (Quéinnec et al., 1991 ; Rabardel et al., 2002), des variabilités externes aux individus, c'est-à-dire non liées à l'humain dans la situation de travail et qui peuvent être liées à l'entreprise (Guérin et al., 1997) et aux conditions techniques (Quéinnec et al., 1991).

Ces variabilités amènent l'opérateur à réguler son comportement afin de maintenir sa performance (Guérin et al., 1997, 2021). Ces régulations sont des corrections « du fonctionnement du processus qui est fonction de l'écart entre le résultat à atteindre et celui

effectivement obtenu » (Leplat, 2006, p. 15). Si la régulation au sein de la tâche n'est pas possible du fait d'un manque de marge de manœuvre (Coutarel et al., 2015), l'opérateur effectuera un compromis insatisfaisant qui nuira à sa santé mentale, physique et/ou sociale (Six, 2016). Le modèle de l'activité (Leplat & Cuny, 1977) va considérer que toute activité de travail est le résultat de la mobilisation des « conditions internes » des opérateurs en réponse à une tâche. Les conditions internes sont regroupées en 3 catégories : les ressources physiques, mentales et sociales. Plus tard, en ergonomie, la dimension « mentale » sera étudiée sous deux aspects : la sphère psychologique et la sphère cognitive, rapportant à quatre le nombre de dimensions de l'individu au travail mobilisées par la tâche et donnant lieu à l'activité : ressources physiques, psychologiques, cognitives et sociales.

Afin de pouvoir catégoriser les différents types de variabilités, nous nous appuyons sur les modèles qui les ont décrites, à savoir les modèles se rapportant aux variabilités internes à l'opérateur et ceux se rapportant aux variabilités externes.

1.1.1. Variabilités internes à l'opérateur

Quéinnec et al. (1991, p. 44) nous indiquent que « la notion de variabilité signifie qu'un même individu peut modifier sa façon de travailler (variabilité intra-individuelle) mais aussi que deux individus ne travailleront pas de la même manière (variabilité inter-individuelle) », ce que confirment Guérin & al. (1997). Rabardel et al. (2002) différencient diversité (différences inter-individuelles) et variabilité (intra-individuelle). Guérin & al. (2006) présentent également la « variabilité des individus » selon deux composantes : la « diversité interindividuelle » (taille, poids, etc.) et les « variations intra-individuelles » qui se décomposent en des « variations à court terme » (fatigue, ressources attentionnelles, etc.) et en « variations avec l'âge » (vieillesse, etc.) qui influent sur les ressources des opérateurs. Les variabilités individuelles concernent donc directement l'opérateur ; il y a les variabilités inter-individuelles, liées aux différences entre les différents opérateurs (taille, genre, expérience, etc.) et les variabilités intra-individuelles, liées aux différences internes à l'opérateur (niveau d'attention, niveau de fatigue, etc.). Les variabilités intra-individuelles pourraient être liées à la dimension personnelle du modèle de l'acceptation située (Cf. Section 2, Chapitre 3), de même, les variabilités inter-individuelles pourraient être liées à la dimension interpersonnelle du même modèle (Bobillier-Chaumon, 2013). Cependant, en fonction du contexte de travail, une variabilité pourra être liée à des dimensions différentes.

Quéinnec et al. (1991) expliquent les causes de ces variabilités. Selon eux, il y a deux catégories de facteurs qui provoqueraient ces variabilités : le « travail à faire » et l'opérateur (p.45). Au sein du travail à faire, les auteurs évoquent la « tâche ou ses conditions d'exécution » et les « conditions techniques du travail ». L'opérateur serait sujet à trois facteurs provoquant des variabilités : l'usure de ses fonctions mises en œuvre, ses rythmicités et son expérience. Nous pouvons extraire le modèle suivant de leurs conclusions (Cf. Figure 18).

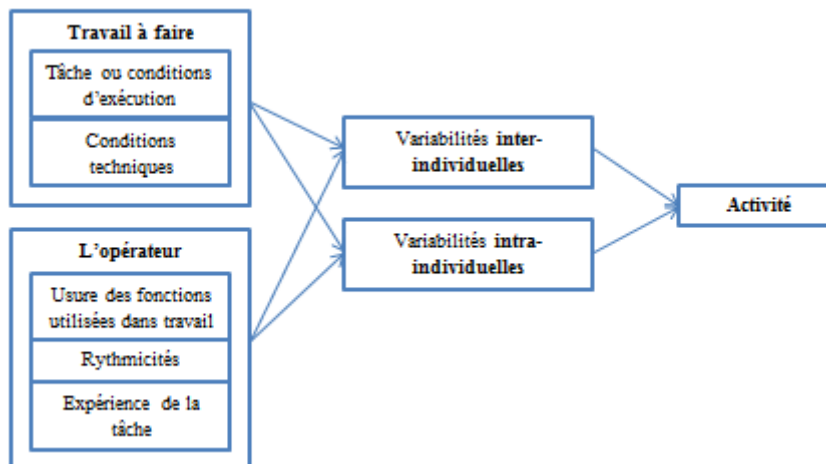


Figure 18. Les variabilités et leurs facteurs selon Quéinnec et al. (1991)

Les variabilités ne sont pas seulement issues de l'opérateur, certaines sont d'origine externe (Guérin et al., 2006).

1.1.2. Variabilités externes à l'opérateur

Pour Guérin et al. (2006, p. 82), il y a les variabilités « dans l'entreprise » ; parmi ces variabilités, on peut trouver les variabilités dites « normales » (demandes des clients, etc.) qui sont prévisibles et les variabilités « incidentelles » (une pièce qui casse, un dossier incomplet, etc.) qui sont imprévisibles. Elles vont pousser l'opérateur à adapter sa manière de réaliser la tâche ce qui va avoir des impacts sur ses résultats et sur lui-même. Quéinnec et al. (1991) décrivent plus globalement la « variabilité de la situation » et l'« évolution » (vieillesse, transformation, etc.). Ces auteurs attribuent au terme « variabilité » une temporalité immédiate. En effet, dès lors que la dimension est inscrite dans une temporalité immédiate, elle est caractérisée comme une « variabilité », et si l'objet évolue dans le temps, alors c'est une « évolution ».

Selon Guérin et al. (2006), les résultats du travail peuvent influencer les variabilités (ex. l'augmentation des rebus peut influencer les décisions managériales qui vont pousser l'opérateur à s'adapter à la nouvelle organisation du travail). Les effets sur l'opérateur peuvent

influencer les variabilités en passant par une modification de l'activité de l'opérateur (ex. le stress induit par l'activité peut diminuer les ressources cognitives disponibles poussant ainsi l'opérateur à s'adapter pour maintenir sa performance). Les variabilités dans l'entreprise et celles des individus peuvent influencer les ressources des opérateurs (ex. je dois réaliser la tâche seul alors que je la réalise habituellement avec mon collègue ; cette situation peut augmenter ma charge de travail et ainsi réduire mes ressources cognitives disponibles). Les variabilités dans l'entreprise influenceraient les caractéristiques de la tâche et donc l'activité de travail, et parallèlement, les variabilités individuelles influenceraient les caractéristiques de l'opérateur qui réalise la tâche et ainsi l'activité de travail (Guérin et al., 1997). C'est également l'intérêt des doubles boucles de régulations décrites par Leplat (2006). En effet, dans son modèle des régulations, l'auteur ajoute deux boucles de rétroaction : les résultats sur l'opérateur vont influencer les ressources disponibles de celui-ci pour effectuer la tâche et les résultats sur l'entreprise vont influencer la tâche en elle-même. Cette partie semble indiquer que les variabilités dans l'entreprise pourraient être liées à une ou plusieurs dimensions du modèle de l'acceptation située, notamment aux dimensions méta-personnelles et trans-personnelles.

Sur la base des définitions de ces différents auteurs, nous proposons le schéma ci-dessous afin de faciliter l'opérationnalisation de la notion de variabilité (Cf. Figure 19).

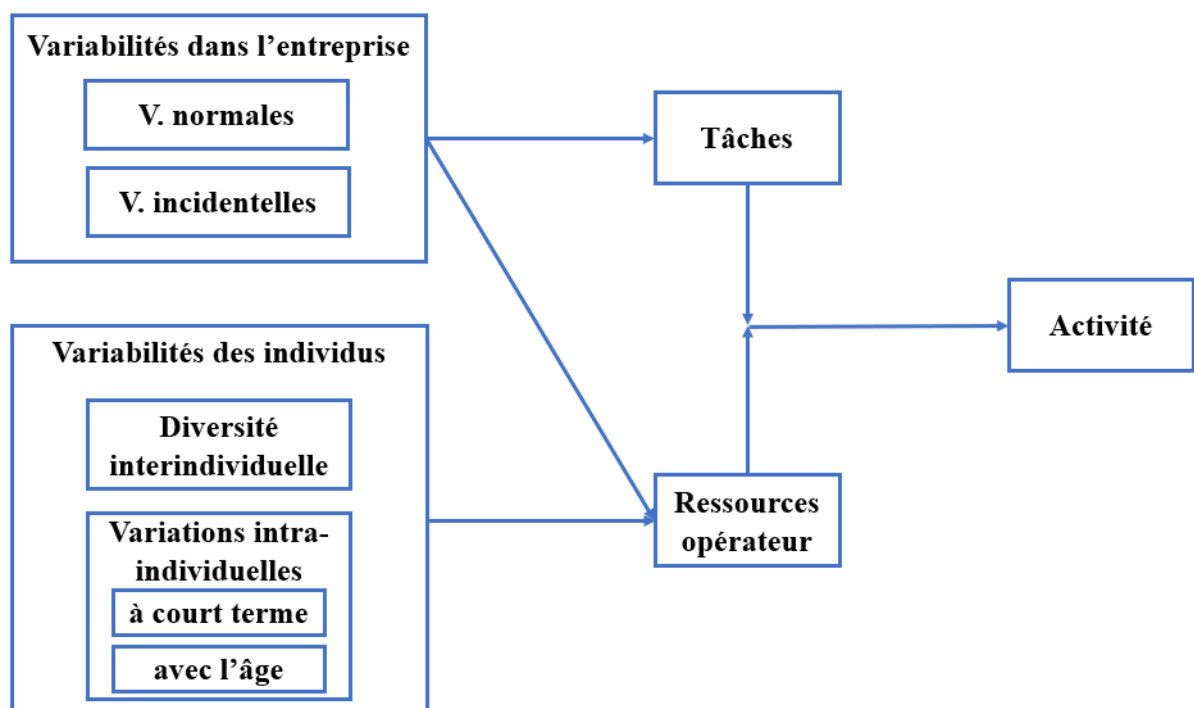


Figure 19. Les variabilités dans l'activité selon Guérin et al., 2006

Le concept de variabilité étant défini, la prochaine partie propose une synthèse des définitions et modèles proposés.

1.2. Synthèse du chapitre

Les variabilités sont les éléments changeants d'une situation de travail. Elles vont amener l'opérateur à devoir modifier son activité afin de s'adapter à ce changement. Ces variabilités sont de différents types selon leur origine. Elles peuvent être individuelles (c'est-à-dire venir de l'opérateur) ou externes à l'opérateur. Les variabilités individuelles sont de deux types (Quéinnec et al., 1991) : intra individuelles (celles issues de l'opérateur en lui-même) ou inter individuelles (celles issues des différences entre opérateurs). Les variabilités externes peuvent être issues des conditions techniques du travail, ou de la tâche à faire (Quéinnec et al., 1991). Elles peuvent également être normales (prévues dans l'organisation du travail) ou incidentelles (Guérin et al., 1997).

L'adaptation de l'opérateur aux variabilités présentes dans son activité peut avoir des impacts sur l'opérateur ainsi que sur les résultats de son travail. Ces impacts sont développés dans le chapitre suivant.

Chapitre 2. Effets des variabilités sur l'opérateur et sur le travail dans le cadre des technologies robotiques

La notion de variabilité, précédemment définie, est utilisée dans de nombreuses publications sans que le terme n'y soit explicitement employé. L'étude des publications scientifiques sur les variabilités a permis de compléter la catégorisation afin qu'elle permette d'inclure, le plus possible, toutes les variabilités présentes dans la situation de travail. Nous avons ainsi pu identifier deux catégories de variabilités : les variabilités individuelles et les variabilités de la tâche, et quatre sous-catégories (inter individuelle, intra individuelle, technique et organisationnelle) et enfin vingt-deux types de variabilités différentes que nous allons présenter dans les prochaines parties. Toutes les catégories de variabilités sont étudiées dans ce chapitre avec des exemples d'études où les impacts de ces variabilités sont identifiés.

2.1. Variabilités individuelles

La première catégorie se situant dans la famille des variabilités individuelles sont les variabilités inter individuelles. Elle est étudiée dans la partie suivante. Ensuite, la deuxième catégorie des variabilités individuelles est étudiée : les variabilités intra individuelles.

2.1.1. Variabilités inter-individuelles

La notion de variabilité inter-individuelle a été déjà définie par Quéinnec et al. (1991) et Guérin et al. (2006) comme renvoyant aux différences entre les opérateurs. Dans cette première catégorie, nous avons pu mettre en avant 3 types de variabilités (physique, cognitive et psychosociale) inspirées des conditions internes issues des travaux de Leplat & Cuny (1977). Ce type de variabilités pourrait influencer une ou plusieurs des dimensions du modèle de l'acceptation située. Les trois types de variabilités (physique, cognitive et psychosociale) sont étudiées dans cette partie.

2.1.1.1. La variabilité physique

La variabilité inter-individuelle physique désigne toutes les sources de variabilités provenant des différences physiques et des différences sur les façons d'utiliser leur corps entre les opérateurs qui réalisent le travail (taille, force, postures, etc.). Notamment, certains travaux présentent les variabilités des gestes professionnels en insistant sur l'importance de

la prendre en compte dans les analyses des situations de travail (Le Bellu et al., 2010; Tomás, 2013). Cette variabilité pourrait potentiellement avoir un impact sur une ou plusieurs dimensions du modèle de l'acceptation située, notamment sur la dimension interpersonnelle.

Pendant une collaboration cobotique, les gestes des humains peuvent avoir un impact sur la performance et sur le confort (Benhabib et al., 2021). Dans leur expérience, les auteurs ont séparé en deux groupes les sujets. Le premier groupe bénéficiait de 90% de manipulations standards (couper du bois avec un cobot, le cobot variant sa force comme si le bois n'avait pas de spécificités) et de 10% de manipulations perturbées (dans la même tâche, le cobot variait sa force comme si le bois possédait des nœuds). Le deuxième groupe bénéficiait de 50% de manipulations standards et de 50% de manipulations perturbées. Par la suite, les sujets ont fait évoluer leur gestuelle en tendant à améliorer leur sécurité par des gestes plus adaptés, au détriment de leur confort immédiat et de leur performance. L'étude a mis en avant que ces différences interindividuelles pourraient avoir des conséquences sur la santé des opérateurs. Un cobot qui se serait adapté à la variabilité gestuelle aurait pu prévenir les atteintes à la santé et aurait pu améliorer la dimension interpersonnelle. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes employés à tester cette adaptation (Fournier et al., 2022 ; Fournier et al., 2024 ; Cf. Étude 2 ; Cf. Étude 3 ; Cf. Étude 4).

2.1.1.2. La variabilité cognitive

La variabilité inter-individuelle cognitive désigne toutes les sources de variabilités venant des différences cognitives entre les opérateurs. Cette variabilité pourrait potentiellement avoir un impact sur une ou plusieurs dimensions du modèle de l'acceptation située, notamment sur la dimension interpersonnelle. Différents opérateurs, même travaillant sur la même tâche, n'ont pas obligatoirement les mêmes ressources attentionnelles à allouer à leur tâche (Gardner et al., 1989).

La collaboration cobotique pourrait apporter une solution à cette variabilité en adaptant en temps réel le cobot à l'opérateur et aux ressources cognitives avec lesquels il effectue la tâche (Lagomarsino et al., 2022). Les auteurs ont démontré que la prise en compte des ressources cognitives de l'humain étaient possibles en temps réel via des caméras et des algorithmes d'intelligence artificielle. Ils ont pu faire diminuer la charge mentale quand l'opérateur semble être en surcharge (ex : rendre les actions du cobot plus transparentes). Cependant, l'effet de cette prise en compte de la variabilité cognitive des opérateurs sur l'acceptation des opérateurs n'a pas été testé. Il convient donc de créer des expériences en

laboratoire et de réaliser des observations sur le terrain afin de répondre à cette question de recherche.

2.1.1.3. La variabilité psychosociale

La variabilité inter-individuelle psychosociale désigne les variations du rapport subjectif au travail et du rapport subjectif à la vie sociale au travail (Gollac & Bodier, 2011). Ce concept a différentes dimensions pour Clot (2015) : la dimension personnelle (expérience, compétence, etc.), la dimension impersonnelle (prescription du poste), la dimension transpersonnelle (les normes) et la dimension interpersonnelle (marge de manœuvre, etc.). La première dimension correspond à notre catégorie « variabilité inter-individuelle », nous gardons donc cet appui théorique pour cette sous-partie. Cette variabilité pourrait potentiellement avoir un impact sur une ou plusieurs dimensions du modèle de l'acceptation située.

En effet, l'expérience peut influencer l'intention d'utiliser un outil technologique (Cippelletti, 2017), de bien vivre le changement d'outil (Karsenty, 2018), et d'accepter cet outil (Bobillier-Chaumon, 2013 ; Wurhofer et al., 2015). Dans le cadre de la conduite automobile, les opérateurs experts vont souvent utiliser une supervision externe de leur comportement, c'est-à-dire qu'ils vont guider leur comportement selon les processus physiques et les situations (Mundutéguy & Darses, 2007). Ainsi, Kuderer et al. (2015) proposent, pour augmenter cette acceptation, de permettre aux véhicules de s'adapter au style de conduite de l'opérateur. Dans le contexte industriel, on note que la variabilité liée à l'expérience au poste des opérateurs amène à des différences en termes de qualité de sortie des produits d'usine, mais que cette variabilité diminue dans le cas d'une collaboration avec un robot (Chacón et al., 2020). Une collaboration cobotique permet donc de lisser l'effet de l'expérience sur les résultats du travail, mais il convient d'étudier les dimensions de l'acceptation située afin de savoir si cette adaptation a des effets sur l'acceptation de l'opérateur vis-à-vis de la collaboration cobotique.

2.1.2. Variabilités intra individuelles

La notion de variabilité intra individuelle a été déjà définie par Quéinnec et al. (1991) et Guérin et al. (1997) comme renvoyant aux différences au sein d'un même opérateur liées au temps courts, moyens et longs. Ce type de variabilités pourrait influencer la dimension

personnelle du modèle de l'acceptation située. Dans cette deuxième catégorie, et en adéquation avec la catégorie précédente, nous avons pu mettre en avant 3 types de variabilités (ressources physiques, cognitives et psychosociales) que nous allons présenter.

2.1.2.1. Variabilité des ressources physiques

La variabilité des ressources physiques désigne toutes les sources de variabilités provenant des variations physiques au sein d'un même opérateur. Cette variabilité pourrait potentiellement avoir un impact sur une ou plusieurs dimensions du modèle de l'acceptation située, notamment la dimension personnelle.

Cette variabilité peut être prise en charge dans le cadre d'une collaboration humain-cobot. En effet, Peternel et al. (2018) ont pu démontrer expérimentalement qu'un cobot pouvait apprendre une tâche avec l'humain, repérer son niveau de fatigue et prendre le relai quand ce niveau de fatigue était trop élevé. Dans l'expérience, l'humain et le cobot devaient scier du bois ensemble. Chacun tenait l'extrémité d'une scie, de sorte que les mouvements de l'un influençaient les mouvements de l'autre et que la tâche était impossible à réaliser seul. Des capteurs renseignaient le cobot sur l'état de fatigue de l'opérateur ; quand cet état était trop élevé, le cobot adaptait sa force en temps réel pour que l'humain puisse se reposer de façon active tout en continuant à couper du bois.

Cette prise en charge de la variabilité étant possible, il serait intéressant de tester son effet sur l'acceptation située.

2.1.2.2. Variabilité des ressources cognitives

La variabilité intra-individuelle des ressources cognitives désigne toutes les sources de variabilités provenant des variations cognitives au sein d'un même opérateur (ex : fatigue mentale). Cette variabilité pourrait potentiellement avoir un impact sur une ou plusieurs dimensions du modèle de l'acceptation située, notamment sur la dimension personnelle.

Nous avons ainsi réalisé un test utilisateur au sein duquel étaient comparés des binômes humain/humain et humain/cobot (Cf. Étude 3). Nous avons introduit une variation dans la difficulté des tâches afin d'entraîner une variabilité de la charge mentale. Dans la condition humain/humain, la charge mentale a bel et bien fluctué. En revanche, dans la condition humain/cobot, la charge mentale a été stable. Les résultats montrent donc que la collaboration humain/cobot a pris en charge la variabilité des ressources cognitives de l'opérateur. Cette étude

a également mesuré l'acceptabilité de la collaboration cobotique et les scores montrent que les opérateurs ayant collaboré avec le cobot ont des scores plus hauts que ceux ne l'ayant pas fait. La prise en charge de la variabilité des ressources cognitives a donc potentiellement fait augmenter l'acceptabilité de la collaboration cobotique que présentent les opérateurs.

2.1.2.3. Variabilité des ressources psychosociales

La variabilité des ressources psychosociales désigne les variations du rapport subjectif au travail d'un même opérateur (e.g. émotions, sens du travail). Nous pouvons nous rapporter aux travaux traitant du sens au travail et de ses variabilités (Cippelletti et al., 2023 ; Forest & Morin, 2007 ; Morin, 2008). Également, cette variabilité désigne les variations du rapport subjectif de l'opérateur à sa vie sociale au travail (ex : présence ou non de soutien social). Pour approfondir, nous citerons ici les travaux de Ruiller sur le soutien social (Ruiller, 2008), ainsi que les travaux de Caroly sur le collectif de travail (Caroly, 2011 ; Caroly & Barcellini, 2013).

Au sein d'une collaboration humain/cobot, la reconnaissance des émotions est possible même si cela reste un challenge pour les roboticiens (Spezialetti et al., 2020). En revanche, les auteurs indiquent que les cobots ne sont pas encore capables de s'adapter à l'émotion qu'ils ont reconnue. Quand les possibilités techniques le permettront, il serait intéressant d'analyser comment cette prise en charge de ce type de variabilités influence l'acceptation située.

2.2. Variabilités de la tâche

La première catégorie se situant dans la famille des variabilités de la tâche sont les variabilités techniques. Elle fait l'objet de la partie suivante. Les variabilités organisationnelles seront présentées à la suite.

2.2.1. Variabilités techniques

La notion de variabilité technique a été déjà définie par Quéinnec et al. (1991) comme renvoyant aux variations des conditions techniques du travail. Ce type de variabilité pourrait avoir un impact sur une ou plusieurs dimensions du modèle de l'acceptation située, notamment sur la dimension organisationnelle. Dans cette première catégorie, nous avons pu mettre en avant 3 types de variabilité.

2.2.1.1. La variabilité du milieu

La variabilité du milieu désigne toutes les sources de variabilités provenant de l'environnement du poste de travail (luminosité, surface de travail, etc.).

Les résultats de l'analyse de l'activité réalisée par Fournier et al. (2023 ; Cf. Étude 1) sur les opérateurs chimistes en R&D montrent que les caractéristiques du poste de travail ont un impact sur les gestes professionnels des opérateurs (ex : sorbonnes, boîte à gants). Un cobot pourrait prendre en compte cette variabilité afin d'améliorer la situation de travail. Par exemple, l'accessibilité des produits étant réduite en boîte à gants, un cobot pourrait s'adapter à l'espace dynamique de la boîte à gants afin de constamment rendre accessible les produits à l'opérateur humain. En effet, dans cette situation, le manque d'accessibilité peut provoquer des chutes de produit et donc impacter directement la gravité du danger associé à la tâche. Une collaboration cobotique prenant en compte cette variabilité permettrait ainsi de réduire les risques pris par les opérateurs (Cf. Étude 4). Il conviendrait par la suite de mesurer l'acceptation située car il est possible de prendre en compte cette variabilité par la collaboration cobotique en tant qu'elle permet de favoriser une bonne acceptation des opérateurs.

2.2.1.2. La variabilité des outils

La variabilité des outils désigne toutes les sources de variabilités provenant des outils que l'on utilise (Equipements de Protection Individuels ou EPI, assistance cobotique, etc.).

Nous avons mis en place un test utilisateur (Cf. Étude 4) qui avait pour but de reproduire en laboratoire un travail d'assemblage de chimie. Les participants avaient différents types d'EPI (gants plus ou moins confortables). Les gants les moins confortables devaient être mis par le participant lorsqu'il souhaitait bouger une pièce dangereuse. Deux conditions étaient testées : une où le cobot organisait son travail sans prendre en compte la difficulté de travail avec les gants inconfortables (condition contrôle), et une où il la prenait en compte (condition expérimentale). Dans le premier cas, le cobot ne donnait pas la priorité à une pièce à prendre plutôt qu'à une autre ; dans le deuxième cas, il donnait la priorité aux pièces les plus dangereuses pour l'humain. Les résultats ont montré que le cobot était capable de prendre en compte efficacement la contrainte de l'humain. En effet, dans la condition expérimentale, la fréquence du port de gants inconfortables a diminué et les participants ont pris « moins de risques » simulés. Cette adaptation aurait potentiellement un impact sur une ou plusieurs dimensions de l'acceptation située, il conviendrait d'étudier cet impact sur le terrain.

2.2.1.3. La variabilité du matériel

La variabilité du matériel désigne toutes les sources de variabilités provenant de la matière première que l'on doit utiliser et/ou transformer (produit, pièce mécanique, etc.).

L'étude citée précédemment (Fournier et al., 2023 ; Cf. Étude 1) sur les opérateurs chimistes en R&D a révélé que la variabilité du type de produit utilisé a un impact sur la façon dont les opérateurs réalisent leur tâche (ex : solvant, produit toxique). En effet, un solvant collant sur un rotor coupant va augmenter le temps de nettoyage de l'opérateur et augmenter sa prise de risque (coupure du gant + produits toxiques sur la peau). Un produit poudreux va être très difficile à nettoyer et pourrait polluer les autres mélanges, ce qui entraînerait un échec de la manipulation et donc potentiellement la frustration de l'opérateur. Une collaboration cobotique prenant en compte cette variabilité permettrait potentiellement de réduire ses effets sur l'opérateur (temps allongé, prise de risque). Il convient de tester cette adaptation cobotique et de mesurer l'acceptation située.

2.2.2. Variabilités organisationnelles

A notre connaissance, la notion de variabilité organisationnelle n'a pas été traitée. Or, l'étude de la littérature a établi l'importance de reconnaître les variabilités concernant l'organisation du travail comme une catégorie à part, tant les effets de ce type de variabilités sont nombreux (e.g. Caroly & Barcellini, 2013 ; Karsenty, 2011 ; Leite et al., 2013). Ce type de variabilité pourrait potentiellement avoir un effet sur une ou plusieurs dimensions du modèle de l'acceptation située, notamment sur la dimension interpersonnelle. Dans cette deuxième catégorie, nous avons pu mettre en avant deux types de variabilités qui pourraient être prises en compte dans une collaboration cobotique. La variabilité du collectif est étudiée en premier lieu, suivie par la variabilité des prescriptions.

2.2.2.1. La variabilité du collectif

La variabilité du collectif désigne toutes les sources de variabilités provenant du relationnel au sein de l'activité (collègues, travail collectif, etc.).

L'étude de Karsenty (2018) a montré qu'une bonne inclusion de l'opérateur dans un collectif de travail peut diminuer les impacts négatifs de l'implémentation des technologies. Un

collectif de travail efficace serait donc protecteur pour l'opérateur dans le cadre de l'implémentation d'une nouvelle technologie, son absence ou son mauvais fonctionnement serait donc potentiellement dommageable (Karsenty, 2011). Une collaboration cobotique pourrait avoir une flexibilité suffisante pour prendre en compte cette variabilité. Un cobot pourrait essayer de renforcer le soutien social en transmettant des messages de collègues lorsque l'opérateur est isolé par exemple. Dans le domaine de la robotique sociale, plusieurs exemples de technologie montrent les effets bénéfiques des robots interactifs sur les personnes qui interagissent avec dans le cadre de la santé, de l'éducation, du travail, des services publics et de la domotique (Leite et al., 2013). Dans la revue de littérature de Leite et al. (2013), les études mises en avant dans le contexte du travail n'interrogent pas les impacts sur le collectif ; en revanche, on note une amélioration des relations interpersonnelles dans le contexte de la santé et de l'éducation. Par exemple, les auteurs citent une étude qui a eu lieu dans le secteur de la santé (Wada & Shibata, 2007). Cette expérience a été réalisée dans une maison de retraite, les interactions des résidents ont été enregistrées par vidéo tous les jours pendant plus d'un mois. Les chercheurs ont noté une amélioration des relations inter-résidents après un mois d'interaction avec le robot social Paro (AIST, Japon). Ces résultats ont été reproduits plus récemment dans plusieurs études (Giusti & Marti, 2006 ; Turkle et al., 2006). Il conviendrait de reproduire ces études dans le cadre des activités de travail en industrie et d'analyser les effets d'une adaptation cobotique à la variabilité du collectif de travail sur l'acceptation située.

2.2.2.2. La variabilité des règles de travail

La variabilité des règles de travail désigne toutes les sources de variabilités provenant des injonctions (objectifs donnés aux opérateurs, horaire de travail etc.).

Notre troisième étude (Cf. Étude 3) a montré que dans le cadre d'une collaboration cobot-humain, un cobot pouvait s'adapter à la variation de la difficulté des tâches, de façon plus efficace qu'une collaboration humain/humain. En effet, le taux de réussite de la tâche reste constant (98% ou plus) que la tâche à effectuer soit complexe ou simple. En revanche, dans une collaboration humain/humain, le taux de réussite, élevé en tâche simple (98%), chute drastiquement en tâche complexe (56%). Un cobot peut donc prendre en charge la variabilité des prescriptions de tâche. Il pourrait y avoir un lien entre la prise en charge de variabilité et l'acceptation située de la collaboration. Il convient de tester ce lien.

Ce chapitre permet de mettre en lumière tous les types de variabilité présents dans les situations de travail (Cf. Figure 20). Il est synthétisé dans la partie suivante.

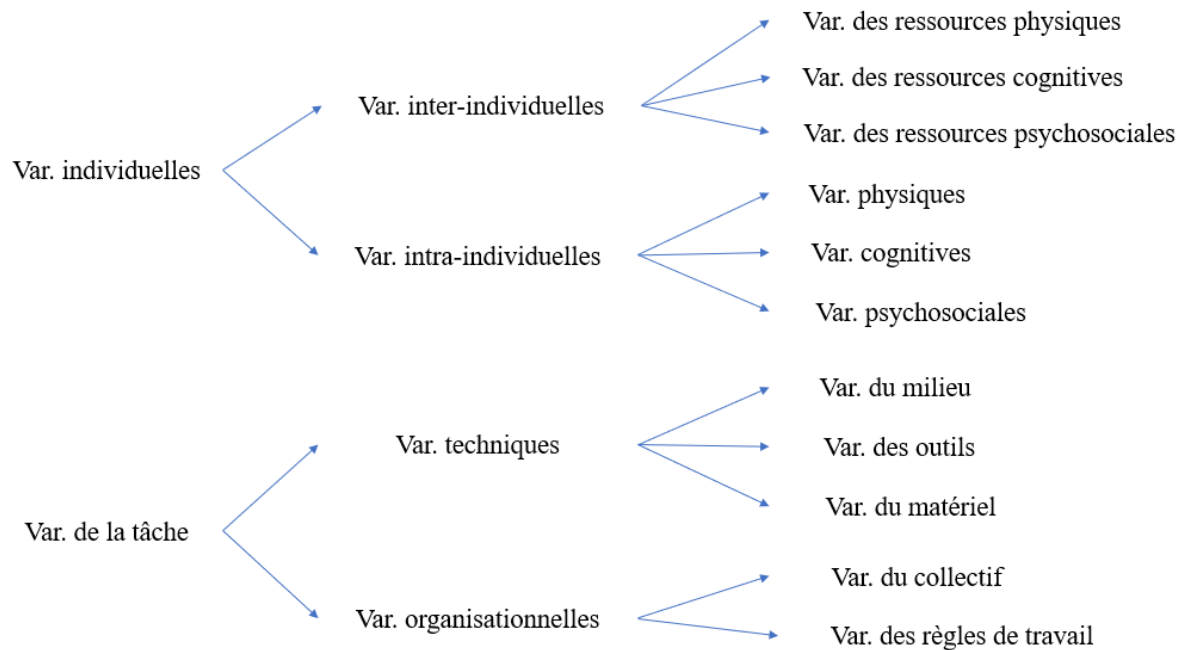


Figure 20. Illustration de tous les types de variabilités recensées dans la littérature liées aux interactions humain/cobot au travail

2.3. Synthèse du chapitre

Les variabilités issues de la tâche à effectuer et celles issues des opérateurs ont de nombreux effets sur les résultats et sur l'opérateur lui-même. Ces effets sont très divers, ils dépendent de l'opérateur qui s'y adapte et des conditions de travail. Ils peuvent être positifs et négatifs. L'étude des situations où une technologie robotique est implémentée permet de mettre en lumière qu'une adaptation des cobots aux variabilités de la situation a des résultats prometteurs. L'implémentation des cobots permet d'optimiser la répartition du travail et de diminuer les pressions à l'adaptation que subissent les opérateurs dans la situation de travail.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons conduit une recherche-action dans le secteur de la chimie Recherche & Développement (R&D). La quatrième partie aura pour but de présenter ce milieu afin d'analyser les variabilités qui pourraient s'y trouver. Le but a été d'analyser les variabilités présentes et de réfléchir aux meilleures conditions d'implémentation d'un cobot.

SECTION 4. TRAVAIL DE CHIMISTE EN RECHERCHE & DEVELOPPEMENT (R&D)

Chapitre 1 : Les chimistes en R&D, quelle activité ?

Le terrain de cette thèse est un laboratoire de R&D en chimie, autrement appelé « Laboratoire du futur ». Afin de mieux saisir les implications liées au type d'activité de ce secteur, il convient d'étudier dans un premier temps la littérature scientifique sur cette thématique. Le but est de savoir si des interventions de psychologues du travail et d'ergonomes ont eu lieu et les résultats potentiels qui en sont issus.

Ce chapitre commence par une définition de la R&D en chimie et une présentation de ses principales missions. Ensuite, le chapitre décrit le contenu des activités des chimistes en R&D ainsi que le matériel et les outils qu'ils utilisent. L'objectif est de mieux comprendre ce métier ainsi que les contraintes qui lui sont liées.

1.1. Définition de la chimie Recherche & Développement

La fonction Recherche & Développement (R&D) d'une entreprise « regroupe l'ensemble des processus qui, partant de la recherche fondamentale ou d'une invention, assurent sa faisabilité industrielle » (Ministère de l'économie des finances et de la souveraineté industrielle et numérique, s. d.). Ce processus correspond au passage de l'élaboration d'une solution en laboratoire de recherche à la production industrielle en usine. Selon le Ministère, les équipes de R&D ont trois missions principales :

- La veille technologique (lecture d'articles scientifiques, rapports d'activité des entreprises concurrentes)
- Développement de nouvelles technologies
- Protection des innovations grâce au dépôt de brevets

Dans le cadre de la chimie R&D, les missions sont les mêmes. Bayram et Bilim (2012) ont identifié trois situations d'activité spécifiques aux chercheurs en chimie : la reproduction (reproduction d'une manipulation pour en vérifier le résultat), l'extension (le résultat n'est pas connu mais doit rester dans les limites attendues) et l'exploration (production de quelque chose de nouveau, pas de connaissance du résultat futur).

Les chimistes en R&D sont donc inscrits dans une dynamique perpétuelle d'innovation technologique. Pour ceci, ils doivent adapter le contenu de leur travail ainsi que le matériel qu'ils utilisent. Cela fait l'objet de la prochaine partie.

1.2. Contenu du travail et équipements utilisés

Peu de publications portent sur l'activité d'opérateurs en chimie R&D. Les études disponibles se concentrent sur trois dimensions distinctes : 1. Les équipements et les risques liés à leur utilisation ; 2. L'attention sur la tâche, 3. La gestion de l'espace en laboratoire de chimie, et 4. La gestion du risque. Cette partie revient en détail sur chacun de ces points dans l'ordre de leur présentation.

Premièrement, l'opérateur en chimie R&D utilise des équipements de protection afin de réduire des risques chimiques (Tokatli et al., 2021). L'un de ses équipements est la boîte à gants (BAG, Cf. Figure 21). Il s'agit d'un « compartiment, une boîte ou une hotte utilisés pour enfermer une opération ou un processus afin de contenir et de séparer les matières dangereuses du personnel d'exploitation ou des conditions environnementales défavorables » (Garden, 1962, p. 9).

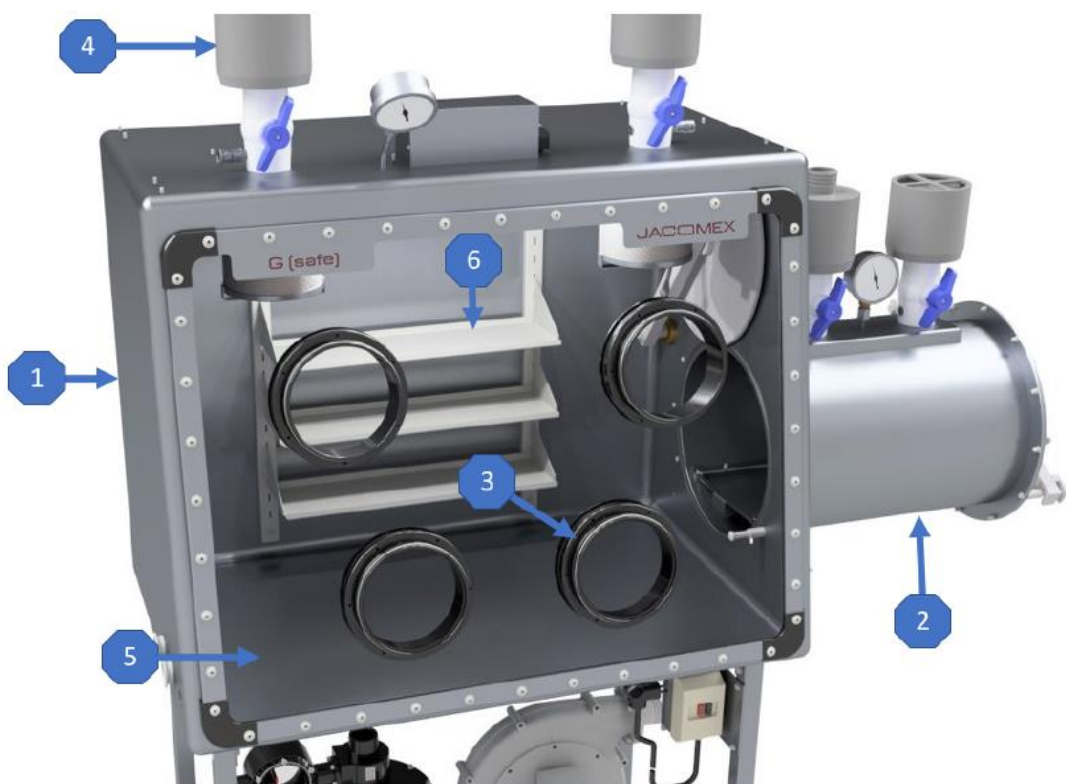


Figure 21. Les différents éléments de la BAG : (1) coque de protection, (2) espace d'entrée / sortie, (3) emplacements des gants, (4) équipement de surveillance de l'environnement, (5) fenêtre et (6) étagères (Tokatli et al., 2021)

Le composant (1) est la barrière d'avec le monde extérieur, on trouve une glace protectrice (5) permettant de voir tout ce qui se passe à l'intérieur. Les trous pour les gants (3) sont standardisés à 11 cm de diamètre, ils peuvent être à plusieurs endroits et plus de deux pour permettre à l'opérateur d'atteindre tous les recoins de la boîte. On trouve également une entrée de matériel (2). Pour maintenir l'environnement, il y a des évacuations (4) qui permettent d'optimiser la température, la pressurisation, etc. On trouve parfois des rangements ou autres en fonction de l'utilisation de la boîte à gants (6). Les BAG sont dites isolantes quand le but est de protéger le composant à l'intérieur du monde extérieur, et de confinement quand il faut protéger le monde extérieur du composant (McNair, 2006). Souvent elles sont faites en acier inoxydable pour sa durabilité et son coût. Les gants sont souvent en un type spécifique de plastique dépendamment du type de process réalisé. Les fenêtres sont souvent grandes et légèrement inclinées pour ne pas avoir d'angles morts. Leur matériel de fabrication dépend des process utilisés à l'intérieur. L'environnement à l'intérieur de la BAG est souvent décrit en termes de pression (positive, négative) et de type d'air utilisé (gaz, réactifs, etc.). L'usage de la BAG n'est pas constant, les opérateurs oscillent entre périodes d'activité (des services de 7h) et d'inactivité pendant plusieurs jours. En activité, un opérateur, parfois deux ou plus travaillent en BAG. Des chaises à taille réglable sont souvent mises à disposition de l'opérateur. La plupart des tâches sont le remplissage des récipients de liquide, l'ouverture de contenants et l'échange des contenants pleins par des contenants vides (McNair, 2006). Les tâches sont souvent très répétitives et nécessitent la main et le bras (tenir, saisir, positionner, tourner, presser avec précision). De plus, les opérateurs utilisent constamment des gants de protection qui diffèrent selon la tâche effectuée (McNair, 2006). La littérature sur l'activité des chimistes a cependant relevé un problème majeur concernant cet équipement : il prend peu en compte les caractéristiques des humains qui vont les utiliser (McNair, 2006).

Deuxièmement, les chimistes évoluent dans un environnement dangereux. Ils ont donc recours à un processus pour limiter les risques : un contrôle constant de la situation (Bayram & Bilim, 2012). Leur attention est ainsi pleinement engagée dans la tâche afin de ne pas rater un indice qui indiquerait un échec ou un danger chimique. Ils sont très conscients du résultat de leur manipulation et ne s'attardent pas à finir la manipulation si une erreur a été commise au cours du processus. Certains auteurs attribuent cela aux attentes des chimistes quant au résultat escompté (Bayram & Bilim, 2012). Pour surveiller la manipulation expérimentale de cette façon, cela nécessite que leur attention soit entièrement dévolue à la tâche. Le niveau d'attention de l'opérateur est donc déterminant pour son activité. En effet, ce sont les ressources attentionnelles qui permettent le contrôle de la manipulation. Si ces ressources venaient à être

réduites par divers moyens (rythme de travail, horaires, fatigue, etc.), le contrôle pourrait être moins efficace.

Troisièmement, un laboratoire de chimie doit être conçu de sorte à pouvoir évoluer avec les nouveaux équipements et les procédures (Triolet et al., 2002). On peut regrouper les laboratoires en deux grandes catégories : R&D (recherche et innovation) ou contrôle (recherche et contrôle d'un produit / procédé). Dans les deux cas, le travail se répartit entre le travail expérimental dans le laboratoire et le travail de préparation et de traitement des résultats dans les bureaux (Cf. Figure 22).

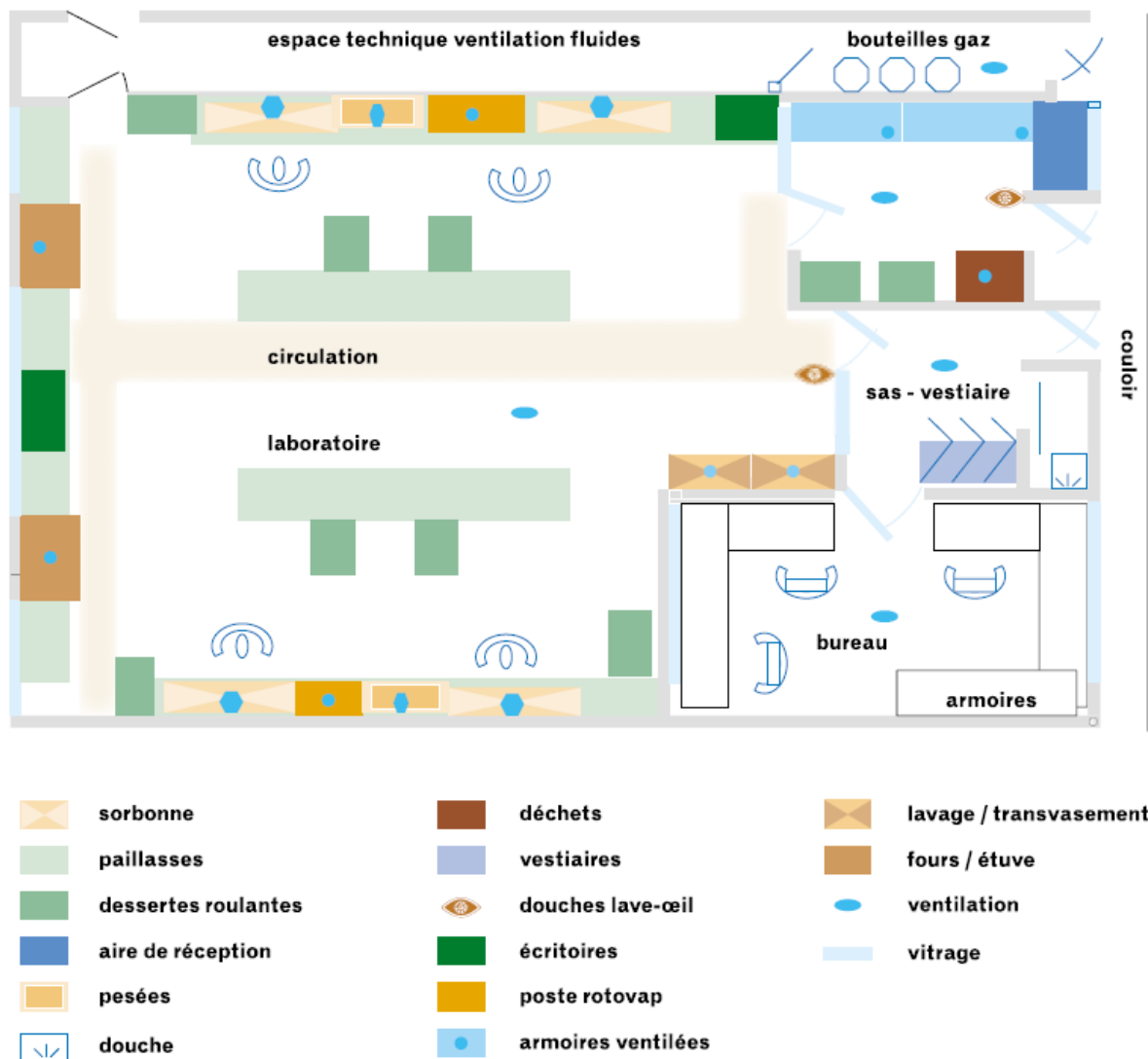


Figure 22. Exemple d'organisation d'un laboratoire de chimie (Triolet et al., 2002, p. 13).

Souvent, un opérateur va gérer plusieurs manipulations en même temps et donc les déplacements sont nombreux. Dans un laboratoire de R&D, on a une variabilité de tâches, de modes opératoires, de matériels employés et de produits utilisés (Triolet et al., 2002). Il y a

cependant des éléments qui sont toujours présents dans les différents laboratoires : des tables pour travailler sur des documents, des paillasses sèches pour y placer le matériel qui n'utilise pas d'eau, des paillasses humides avec une arrivée et une évacuation d'eau, du matériel de stockage des déchets, des points de douche (complète et pour les yeux), des coins vestiaires, des espaces de circulation et des équipements de ventilation et/ou de pressurisation. En fonction des activités réalisées, on peut y trouver également des sorbonnes, des BAG, des fours et une multitude d'autres éléments.

Quatrièmement, de par les dangers présents dans l'environnement de travail, les chimistes doivent élaborer individuellement ou collectivement des stratégies de gestion du risque (Béguin et al., 1999). Ces auteurs ont réalisé une analyse de l'activité des chimistes avant et après l'implémentation d'une alarme dans un laboratoire de chimie. Avant l'introduction de l'alarme, ils ont remarqué que les chimistes s'approchent d'un risque (température minime) pour s'éloigner d'un autre risque plus dangereux (température trop élevée qui peut mener à l'explosion). Des capteurs présents dans le laboratoire leur permettaient d'avoir la température en temps réel. Ainsi, ne pouvant éliminer totalement le risque, ils priorisaient les dangers selon leurs connaissances de la tâche afin de minimiser leurs impacts. A la suite de cette première analyse de l'activité, une alarme a été introduite. Son but est de donner la température, de prévenir lors d'un danger et de donner l'ordre de fuite si le danger devient trop grand. Après son introduction, l'activité des opérateurs a changé sous certains aspects. En effet, ils se sont mis à beaucoup consulter l'alarme et beaucoup moins le thermomètre des capteurs. Cela s'explique par la plus grande précision du thermomètre présent sur l'alarme comparativement aux thermomètres des capteurs. Ils ne consultaient pas l'alarme pour les informations qu'elle donnait sur l'état de danger mais pour l'information sur la température. Ils n'écoutaient les informations de danger que lorsque le danger était trop grand et que la fuite était la seule option raisonnable. Ils ont donc une haute perception de leur propre compétence à prioriser et à maîtriser les dangers et n'utilisent que peu des dispositifs qui permettrait de les aiguïser. Leur activité est continuellement ponctuée par une gestion des risques nécessitant une attention accrue et une bonne conscience de la situation.

1.3. Synthèse du chapitre

Les chimistes en R&D s'inscrivent dans une dynamique d'innovation technologique pour l'industrie. Ils réalisent des manipulations expérimentales pour améliorer des technologies et/ou des process qui seront par la suite implémenté dans l'industrie. Leur activité les amène à utiliser du matériel spécifique possédant de nombreuses contraintes. Également, ils doivent avoir un contrôle attentionnel constant durant plusieurs heures afin d'éviter tout risque. Ce contrôle peut être difficile à maintenir. Ils évoluent dans un environnement dangereux et dans des locaux en perpétuelle évolution pour s'adapter aux nouveaux process entrants. Ainsi, ils doivent avoir une bonne conscience des situations afin de pouvoir gérer les dangers présents dans leur environnement et être capables de s'adapter.

Cette adaptation qui leur est imposée et toutes les contraintes liées à leur activité pourraient avoir des impacts négatifs sur leur santé. C'est l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 2 : L'activité de chimiste en R&D, quels impacts sur les opérateurs et leur activité ?

2.1. Introduction des impacts sur les opérateurs et leur activité

Le peu d'études disponibles sur les opérateurs en chimie R&D se focalisent sur les opérateurs en BAG et dans l'univers du nucléaire. Ces études utilisent en majorité l'observation de poste et les mesures de risques de développer des troubles musculosquelettiques (TMS), mais peu d'informations ont été récoltées sur les opérateurs eux-mêmes. Ainsi, ce chapitre se concentre sur le nombre limité d'études qui ont documenté les impacts de l'activité de chimiste sur les opérateurs et les contraintes qui y sont associées (de façon globale, sans focus sur la chimie R&D).

Ce chapitre débute par l'étude des impacts des équipements utilisés par les chimistes sur eux-mêmes et sur leur activité. Les impacts du contrôle attentionnel constant sont ensuite discutés dans une seconde partie. La troisième partie s'intéresse aux différents impacts du milieu de travail des chimistes et la quatrième partie se concentre sur les impacts de la gestion du risque sur les opérateurs et leur activité.

2.2. Les impacts identifiés par la littérature scientifique des équipements utilisés par les opérateurs chimistes

Les équipements qu'utilisent les opérateurs chimistes ont des impacts sur eux-mêmes ainsi que sur leur activité. Cette partie s'intéresse plus particulièrement à deux types d'équipement : les gants et les BAG. En effet, les études sur les impacts de l'activité des chimistes sur eux-mêmes étant rares, la diversité des équipements mis en avant est elle aussi limitée.

Notamment, les opérateurs utilisent constamment des gants de protection qui diffèrent selon la tâche effectuée (McNair, 2006). Ces gants peuvent avoir un impact sur la santé et la performance des opérateurs les utilisant (Sung et al., 2020). En effet, les gants disponibles dans les BAG réduisent la force comme la contraction volontaire maximale de saisie et le pincement à deux doigts (Sung et al., 2020). On trouve également des effets négatifs des gants sur d'autres performances manuelles. Cette réduction de force implique des mouvements et des postures néfastes de la main et du poignet pour contrer ces effets. Les gants provoquent un taux de friction statique bas, ce qui augmente la force nécessaire pour la saisie. Une plus grande pliabilité diminue les informations tactiles et augmente la force nécessaire. Ces postures posent un risque de développer un TMS. Les auteurs ont voulu tester l'impact du gant (épaisseur,

coefficient de friction et pliability) sur les performances manuelles (saisie et pincement), le but étant de formuler des recommandations pour le développement de meilleurs gants. Sung & Chiu (2019) ont remarqué que les gants en Néoprène et en Hypalon diminuaient les performances et augmentaient l'inconfort.

Les BAG présentent également des risques. En effet, dans son étude, McNair (2006) note plusieurs points d'alerte concernant le travail en BAG : une vision réduite, des postures inconfortables, des frottements et des mouvements répétitifs et inconfortables des poignets. L'étude nous indique également l'absence d'une adaptabilité complète des BAG aux opérateurs. Souvent, les tailles de ces boîtes sont déterminées surtout par le composant qu'on va manipuler à l'intérieur et non par l'opérateur qui va les utiliser. Il y a des critères de construction mais il y a peu de place pour les variabilités humaines. En effet, les BAG doivent correspondre aux besoins de 5% des femmes et de 95% des hommes (McNair, 2006). De fait, de nombreux opérateurs n'ont pas la taille optimale pour leur utilisation et doivent donc mobiliser davantage leur poignet. Les autres problèmes notés sont : l'éclairage de la BAG via la fenêtre, des postures inconfortables de la tête et du cou dû à une fenêtre trop plate, des problèmes d'accessibilité qui poussent un pourcentage d'opérateurs à se tordre le poignet car ils ne peuvent pas placer leur épaule correctement, un frottement constant issu des trous des gants de la BAG et des mouvements répétés de déviation du poignet. Les tâches de remplissage de contenant et de bouchonnage de contenant sont les plus critiques. L'auteur note un risque élevé de développer des TMS.

Les équipements utilisés par les chimistes peuvent donc avoir des impacts sur leur santé et sur leurs performances. La nature particulièrement dangereuse de la tâche amène l'opérateur à maintenir son attention de façon intense et prolongée. Cela peut avoir des impacts que nous allons étudier dans la partie suivante.

2.3. Les impacts identifiés par la littérature scientifique du contrôle attentionnel constant sur les opérateurs et leur activité

Le contrôle attentionnel chez les opérateurs en chimie R&D est constant lorsqu'ils sont en manipulation expérimentale. Cependant, peu d'études ont été réalisées précisément sur les impacts de ce contrôle.

Le contrôle attentionnel constant peut avoir des impacts sur les opérateurs chimistes et sur leur activité. En effet, certains opérateurs travaillent pendant de longues heures en BAG, et l'attention humaine n'est pas faite pour supporter un engagement aussi important de ressources

pendant une aussi longue période de temps (Barthe et al., 2004 ; Bayram & Bilim, 2012). Cette attention surutilisée peut mener à de nombreuses erreurs qui peuvent à leur tour modifier les résultats de la manipulation et augmenter les risques de la situation (Hellier et al., 2001). De plus, les tâches qu'ils réalisent sont parfois très répétitives et peuvent donc amener à une baisse d'attention (Mork & Choi, 2015). Le contrôle n'est pas focalisé sur le résultat après l'action mais il est simultanément à l'action (Bayram & Bilim, 2012), les opérateurs peuvent donc facilement se retrouver en surcharge cognitive.

La sollicitation attentionnelle abusive pourrait avoir des impacts sur la santé et la performance des opérateurs. Les locaux dans lesquels évoluent les chimistes pourraient également avoir des impacts. Ceci est traité dans la partie suivante.

2.4. Les impacts identifiés par la littérature scientifique des locaux sur les opérateurs et leur activité

Les opérateurs en chimie R&D évoluent dans des locaux spécialisés qui ont de nombreuses contraintes. Cependant, à notre connaissance aucune étude ne s'est intéressée précisément à l'impact de ces locaux sur les opérateurs.

Les variabilités présentes dans les laboratoires de chimie amènent les opérateurs à constamment s'adapter à leur milieu de travail et aux changements au sein de leurs tâches quotidiennes (Triolet et al., 2002). Cependant, certaines de ces variations ne sont pas adaptées à l'espace de travail et peuvent impacter les performances, la santé et la sécurité des opérateurs (Garden, 1962 ; Guérin et al., 1997, 2021 ; Triolet et al., 2002). Les études n'entrent pas dans le détail des impacts et il ne s'agit pas d'observation systématique de l'activité. Ces données sont donc à prendre avec précaution.

L'environnement physique de travail des chimistes pourrait donc avoir des impacts sur eux-mêmes. Également, la gestion du risque, activité transversale du métier de chimiste peut avoir des impacts sur les opérateurs et leurs performances. Ceci fait l'objet de la prochaine partie.

2.5. Les impacts identifiés par la littérature scientifique de la gestion du risque sur les opérateurs et leur activité

La gestion du risque est une partie très importante du métier de chimiste. En effet, le risque étant prédominant, sa gestion est une prérogative de l'activité de chimiste. Dans la chimie R&D,

certaines process peuvent être totalement innovants et dans ce cas, le risque peut être encore plus présent car les dangers peuvent être inconnus. Peu d'études en psychologie du travail et en ergonomie s'intéressent précisément à l'impact de la gestion du risque sur les opérateurs et sur leurs performances.

Une étude s'intéressant à la téléopération assistée par un robot en BAG (Tokatli et al., 2021) pour l'industrie nucléaire a pu émettre quelques limites à cette collaboration du fait de son impact sur la gestion des risques. Notamment, bien que le robot pourrait prendre en charge certains risques (ce qui pourrait réduire la charge mentale), il en provoquerait d'autres (e.g. risques de collision). Les opérateurs devraient pouvoir appliquer le « YOLO » c'est-à-dire « You Only Look Once³² » pour gérer le mieux le risque en BAG. En effet, l'opérateur en chimie doit pouvoir, en un regard, avoir les informations nécessaires sur les résultats de la manipulation et les risques présents (Tokatli et al., 2021). Le manque de visibilité est souvent présent en BAG (McNair, 2006 ; Pic, 1987), or ce problème empêche le « YOLO », ce qui peut amener à des erreurs et à des prises de risques. Parfois, le travail en BAG se fait à deux, la gestion du risque est donc partagée entre deux opérateurs qui n'ont pas forcément conscience de ce que fait leur collègue. La gestion du risque peut être plus difficile et amener à des erreurs d'appréciation de la situation qui peuvent avoir un impact sur les opérateurs et leurs performances (McNair, 2006).

Les méthodes de gestion des risques chez les chimistes, bien que peu étudiées, peuvent avoir des conséquences sur les opérateurs, leurs performances et leurs prises de risques. Les contraintes identifiées dans la littérature pourraient potentiellement être amoindries grâce à l'aide d'une technologie cobotique. Cela fait l'objet de la prochaine partie.

2.5. L'activité de chimiste de R&D en chimie, possibilité d'une aide technologique ?

Cette partie propose de discuter des bénéfices et des contraintes qu'une aide technologique pourrait apporter aux chimistes R&D. A notre connaissance, aucune publication n'a discuté la possibilité d'utiliser des cobots afin d'assister l'opérateur chimiste dans son activité pour en réduire les impacts négatifs. La plupart des publications récentes traitant du travail de chimiste et de l'utilisation de robots ouvrent les possibilités d'automatisation et propose d'écarter le facteur humain (Thurow, 2023). Certaines publications ouvrent la voie à une forme de

³² En français : « tu ne regardes qu'une fois »

collaboration avec l'intelligence artificielle (Duros et al., 2019), montrant ainsi qu'un duo entre un humain et une intelligence artificielle (IA) performe mieux qu'une IA ou qu'un humain seul pour des tâches de reconnaissance de molécules. Cependant, ces études ne traitent pas précisément des cobots et de leurs apports dans l'activité de chimiste.

Les technologies émergentes ont fait leurs preuves pour la gestion des risques dans l'activité de chimistes (Béguin et al., 1999), notamment dans une activité particulièrement dangereuse : la chimie nucléaire. Béguin et al. (1999) ont étudié l'impact d'une technologie (alarme) adaptative à l'environnement du chimiste et lui permettant d'être averti du niveau de risques présent. Cette technologie indique également quand l'opérateur doit partir du lieu car le risque pour sa santé est trop important. Les observations ont montré que les opérateurs écoutaient ce signal et quittaient les lieux quand la technologie leur demandait de le faire. Avant l'implémentation de cette technologie, les opérateurs restaient jusqu'au déclenchement de l'explosion pour essayer de l'éviter. L'alarme intelligente peut donc directement éviter la mort de nombreux opérateurs. De la même façon, un cobot pourrait assister un opérateur dans son activité tout en l'avertissant du niveau de danger de la situation afin que celui-ci puisse quitter son poste.

L'environnement de travail nucléaire étant très dangereux, on y trouve souvent des BAG pour protéger les opérateurs. Mais les accidents arrivent, souvent par déchirement des gants qui contamine alors les opérateurs. Les robots seraient très utiles pour pallier ce risque (Tokatli et al., 2021). Cependant, l'implémentation d'un robot pose quelques soucis techniques (Tokatli et al., 2021), par exemple, la maintenance in situ, le passage du robot dans les trous des gants, la poussière qui s'accumule et qui endommage le robot, les capacités magnétiques qui ne peuvent pas être exploitées car trop de magnétisme dans une BAG, les matériaux dangereux tel le plutonium qui abîme les robots et qui est difficile à gérer, les taux de radiation qui sont un problème complexe à régler.

Pour le moment, aucune solution robotique ne permet de faire les tâches dans la BAG aussi bien ou mieux que l'humain en autonomie (Tokatli et al., 2021). Certaines tâches sont faisables mais le contrôle de l'humain est indispensable. Il faut donc veiller à ne pas augmenter la charge mentale de la personne. Tokatli et al. (2021) ont créé une simulation de robot en BAG. La simulation s'oriente vers la saisie autonome, les contraintes environnementales de saisie, la saisie sans le modèle de l'objet, la saisie en environnements restreints, la détection de saisie par deep learning, les estimations de saisie, etc. Il semble que pour ne pas augmenter la charge mentale, il faudrait un minimum de formation pour utiliser le robot téléopéré. Les auteurs recommandent de bien réfléchir à quel système utiliser pour tracker efficacement les

mouvements du robot et les risques de collision (qui idéalement doivent être gérés en autonomie). Selon ces auteurs, le problème principal est le manque de visibilité dû à l'environnement restreint. En téléopération, la visibilité pourrait être diminuée. Le robot risquerait de ne pas permettre le YOLO. Les auteurs posent aussi la question de la maintenance du robot. En effet, les auteurs s'inquiètent particulièrement de la radioactivité à l'intérieur de la BAG et la poussière qui s'accumule.

Les études de ce chapitre montrent un réel intérêt des chercheurs à intégrer des technologies qui assisteraient les opérateurs chimistes dans les laboratoires de chimie de façon à réduire les impacts du travail sur leur santé. La prochaine partie synthétise ce chapitre.

2.6. Synthèse du chapitre

Les contraintes présentes dans l'environnement de travail des chimistes sont nombreuses (équipements contraignants, contrôle attentionnel, locaux changeants et gestion du risque constante). Ces contraintes ont des impacts sur les opérateurs en chimie R&D. Ces impacts sont divers : diminution de la dextérité dû aux EPI, postures inadéquates dues à la BAG, surcharge cognitive dû à un contrôle attentionnel constant et à des locaux changeants, et augmentation de la prise de risques dû à l'utilisation des équipements de travail (BAG). Les cobots pourraient être des assistants intéressants pour les chimistes en laboratoire. En effet, ils pourraient gérer la variabilité du risque présent, les tâches de manipulation non appréciées par l'opérateurs, déplacer les objets difficilement atteignables dans une BAG ainsi qu'améliorer la visibilité de l'opérateur. Cependant, cette implémentation pourrait poser certains problèmes, notamment de maintenance du cobot et d'obstruction de la BAG. Pour une implémentation, il convient de réaliser une analyse de l'activité et une identification des variabilités présentes dans la situation de travail.

Les chapitres précédents ont permis de mieux comprendre l'enjeu de la cobotique dans la gestion des variabilités de la situation. Ils ont également permis d'identifier les apports potentiels de cette technologie émergente pour l'activité de chimiste R&D. Il convient désormais de présenter la problématique de la thèse qui justifie le travail qui a été fourni.

Questions de recherche, hypothèses et méthode

QUESTIONS DE RECHERCHE

Notre projet s'inscrit dans l'industrie 5.0 qui vise à tendre vers plus d'utilisation de la collaboration cobotique en industrie, tout en maintenant l'humain au centre de ses préoccupations. Les cobots appartiennent aux technologies émergentes, dans le sens qu'ils sont innovants, leurs usages sont mal déterminés, leur déploiement n'est pas massif et ils inspirent de nombreuses attentes des acteurs de l'industrie. De nombreux chercheurs en ergonomie et en psychologie du travail se sont intéressés à ce type de technologies (e.g. Cippelletti et al., 2023 ; Schoose, 2022). Ainsi pour que leur implémentation soit optimale, il convient d'étudier leur situation d'usage, les caractéristiques de leurs utilisateurs et d'impliquer les opérateurs dès la conception.

La cobotique est un champ d'étude récent. En effet, la première mention du terme « cobot » date des années 90 (Colgate et al., 1996). Les cobots sont des robots programmés pour le travail en interaction avec les humains (Peshkin & Colgate, 1999). Leur but est d'assister l'humain en prenant en charge les activités qui pourraient nuire à sa santé. Ils ne sont que peu implémentés sur les lieux de travail. Cependant, quelques chercheurs (e.g. Compan, 2022 ; Schoose, 2022) ont pu analyser les effets que ces cobots ont sur l'activité et les opérateurs. Ceux-ci ont des effets positifs intéressants (e.g. meilleur taux de succès de la tâche, moins de prise de risques) et des effets négatifs (e.g. augmentation du temps de réalisation d'une tâche, perte de retours sensoriels). Leur implémentation peut donc être intéressante à condition d'être attentif aux besoins des utilisateurs et aux résultats des évaluations de l'interaction.

Ainsi les implémentations humain/technologie ne sont optimales que si les utilisateurs acceptent pleinement la situation (Bobillier-Chaumon, 2013). En effet, si l'opérateur n'accepte pas l'implémentation de cette nouvelle technologie dans son travail, il risque de mal l'utiliser ou de ne pas le faire (Cippelletti, 2017). L'étude de l'acceptabilité (perceptions de l'utilité et de la facilité d'utilisation) et de l'acceptation située (c'est-à-dire sur le lieu de travail) de la technologie est essentielle pour s'assurer d'une bonne interaction et du soutien des opérateurs dans l'implémentation.

Pour garantir une bonne adaptation de la technologie, il convient également de s'interroger sur la globalité de l'Expérience Utilisateur (UX) et pas simplement sur l'acceptabilité et l'acceptation. En effet, évaluer cette expérience permet de comprendre comment les utilisateurs agissent et réagissent à l'interaction. L'UX est importante à prendre en compte car elle va influencer les réactions émotionnelles et l'évaluation que l'utilisateur va avoir (Mahlke & Thuring, 2007). Pour évaluer celle-ci, la méthode du Test Utilisateur (TU) est la plus complète.

Elle permet de placer l'utilisateur en interaction avec la technologie pour observer la façon qu'il a d'effectuer les tâches qui lui ont été confié (Lallemand, 2018).

Les retours des terrains où les cobots sont implémentés indiquent des échecs dus à l'absence de prise en compte des variabilités de la situation. Les variabilités sont les changements issus de l'opérateur ou de la situation de travail qui le poussent à réguler son activité pour maintenir sa performance. Elles ont des effets positifs (e.g. mobilisation physique) et négatifs (e.g. stress, exposition au danger) qui peuvent être gérés au sein de la collaboration cobotique. Ces variabilités sont également présentes dans les situations de travail issues de la R&D en chimie. En effet, un chimiste en R&D est particulièrement exposé aux risques. De plus, nombre des équipements qu'il utilise ne sont pas adaptés à tous les types d'opérateurs (e.g. problème de taille). Une technologie cobotique pourrait aider à diminuer les effets négatifs de ces variabilités.

Afin de répondre à ces différents constats, la thèse s'articule autour de trois questions de recherche.

Premièrement, des variabilités sont présentes dans les situations de travail et diffèrent selon le terrain étudié. Ces variabilités ont des effets sur l'humain et sur son activité. Cependant, il n'existe pas de modèle clarifié des variabilités. Nous nous attachons donc à modéliser les variabilités et à élaborer une grille de repérage pour les intervenants en entreprise.

Deuxièmement, cette grille sera testée sur le terrain d'étude pour identifier les variabilités présentes dans le laboratoire de chimie R&D. En effet, nous avons peu de connaissances de la situation de travail d'un opérateur chimiste. L'analyse sur site permettra de mieux comprendre l'activité de chimiste en R&D pour aiguiller les futurs intervenants dans ce type de structure.

Troisièmement, les cobots sont de plus en plus implémentés en entreprise, bien que nous méconnaissions encore tous les effets de ces technologies émergentes sur l'humain au travail quand on ne prend pas en compte les variabilités de la situation. Ainsi, nous avons mis en place différents tests utilisateurs afin de créer une simulation de situation de travail de collaboration humain-cobot et de tester les effets d'une programmation axée sur la gestion des variabilités ayant un impact potentiellement négatif sur les ressources de l'opérateur et sa performance.

L'enjeu de cette thèse est donc d'identifier les sources de variabilités dans une situation de travail, de mieux comprendre les contraintes du métier de chimistes en R&D et d'effectuer des tests utilisateurs afin d'améliorer la collaboration cobotique pour la rendre adaptée aux besoins issus du terrain d'étude. La production d'outils méthodologiques à destination des ergonomes et des psychologues du travail est un attendu important du projet. Il s'agit de fournir une

méthode originale de conception de postes de travail pour les usines du futur avec l'introduction d'un cobot et la co-construction de la programmation avec des informaticiens.

Ces différents objectifs nous amènent à formuler les hypothèses qui seront exposées dans la partie suivante.

HYPOTHESES GENERALES DE LA THESE

H1 (situation de travail) : La situation de travail étudiée contient des variabilités et celles-ci influenceront sur le bien-être au travail et la performance des opérateurs.

H2 (tests utilisateurs) : La prise en charge par le cobot de certaines variabilités dès la conception aura un impact positif sur l'opérateur (e.g. bien-être, perceptions) et sur sa performance.

H3 (tests utilisateurs) : L'acceptabilité de la collaboration cobotique sera plus élevée à la suite d'une collaboration avec un cobot prenant en charge les variabilités de la situation qu'à la suite d'une collaboration ne prenant pas en charge celles-ci (et à la suite d'un autre type de collaboration).

Dans le cadre de cette thèse, nous avons réalisé des études nous permettant de tester ces hypothèses générales. Elles font l'objet des parties suivantes.

MÉTHODE : UNE DEMARCHE DE CONCEPTION CENTRÉE-UTILISATEUR (CCU)

Nous avons utilisé une démarche de Conception Centrée-Utilisateur (CCU) qui a été définie par la norme ISO 9241-210 de 2019 (Organisation internationale de normalisation, 2019). Cette norme est caractérisée par six principes différents :

- La conception est fondée sur une compréhension des utilisateurs, de l'activité et des environnements. Ce que nous réalisons par une étude de terrain afin de répondre à l'Hypothèse 1.

- Les utilisateurs sont impliqués dans la conception et le développement. Ce que nous réalisons par le recueil de l'expérience utilisateur pendant les tests utilisateurs et après afin de répondre aux Hypothèses 2 et 3.
- La conception est orientée et affinée par l'évaluation centrée sur l'utilisateur. Ce que nous réalisons par la succession des tests utilisateurs qui alimentent de nouvelles exigences de conception cobotique.
- Le processus est itératif jusqu'à obtention du résultat souhaité. Nous avons dans le cadre de cette thèse réaliser 3 itérations. Le processus de conception continue au-delà des résultats de cette thèse.
- La conception couvre l'expérience de l'utilisateur dans son intégralité. Dans le cadre des tests utilisateurs, nous avons mesuré une expérience utilisateur centrée sur l'engagement physique, cognitif et psycho-social dans la réalisation des scénarios.
- L'équipe de conception inclut des compétences pluridisciplinaires. Les tests utilisateurs ont été réalisés en pluridisciplinarité.

Dans le cadre du projet de thèse, les utilisateurs finaux ont été impliqués dès le début du projet afin de pouvoir y participer activement. De plus, notre équipe de travail est constituée de professionnels et de chercheurs issus de nombreuses disciplines (e.g. chimistes, ergonomes, informaticiens, psychologues du travail, roboticiens). La manière dont nous avons respecté les autres principes est décrite ci-dessous.

Loup-Escande et al. (2013) recommandent la réalisation de quatre tâches pour appliquer convenablement les six principes d'une CCU. La première tâche consiste à « comprendre et à spécifier le contexte d'utilisation au travers de l'analyse des caractéristiques des utilisateurs potentiels [...], d'une formalisation des tâches que l'utilisateur devra réaliser avec le système et d'une analyse de l'environnement dans lequel le système sera intégré » (Loup-Escande et al., 2013, p. 2). La seconde tâche consiste à « spécifier les besoins et les exigences de chaque partie prenante, en particulier de l'utilisateur, au travers d'une analyse fonctionnelle qui va prendre en compte les aspects techniques, juridique, financiers ainsi que les contraintes liées à l'utilisateur » (Loup-Escande et al., 2013, p. 2). Afin de respecter les principes CCU, nous avons réalisé une analyse de l'activité sur le terrain d'étude. Cette analyse a permis de répondre à notre première hypothèse et correspond aux deux premières tâches à effectuer.

La troisième tâche « est relative à la production de solution de conception [...] sur la base des connaissances techniques d'une part, des connaissances sur les utilisateurs et le contexte d'utilisation d'autre part » (Loup-Escande et al., 2013, p. 2). Nous avons mené trois études en

situation expérimentale, aussi appelées « tests utilisateurs » afin de concevoir une interaction humain/cobot optimale. Dans un souci de facilitation du transfert des connaissances produites expérimentalement vers les situations de travail cibles, les plans expérimentaux ont été alimentés par les analyses de terrain. Et enfin, la quatrième tâche « concerne l'évaluation des solutions conçues par rapport aux contextes d'utilisation, aux caractéristiques et aux besoins des utilisateurs et ce, à tous les stades de la durée de vie du système » (Loup-Escande et al., 2013, p. 2). Nos tests expérimentaux ont été réalisés à la suite les uns des autres afin d'apporter des connaissances innovantes en s'appuyant toujours sur les connaissances qui viennent d'être créées dans une démarche de conception itérative visant à améliorer progressivement un prototype de cobot. Les différents tests réalisés ont permis de répondre aux hypothèses 2 et 3 de la thèse. Pour synthétiser, dans le cadre du projet de thèse, nous avons adapté la méthode de la CCU (Cf. Figure 23).

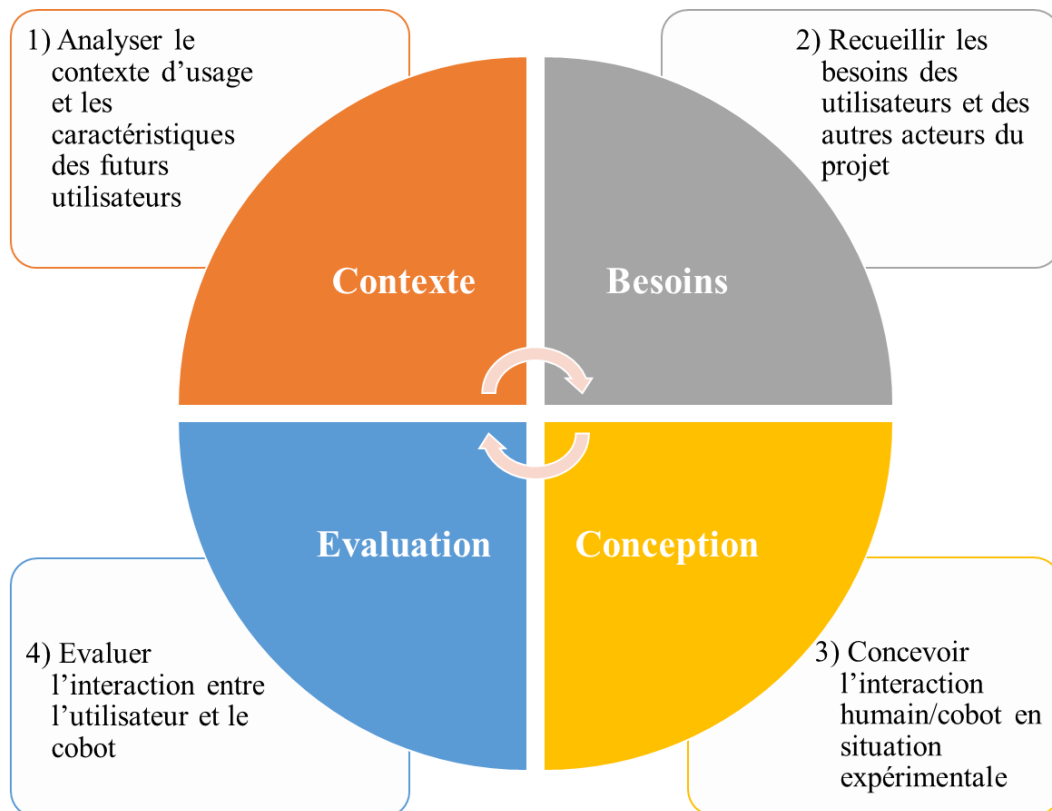


Figure 23. Méthode de CCU utilisée dans la thèse

Dans la suite de cette partie, nous allons décrire les trois études qui ont permis de tester notre première hypothèse (Cf. Partie « Hypothèses générales de la thèse », p.113), notre deuxième hypothèse (Cf. p.113) et notre troisième hypothèse (Cf. p.113). Même si elles sont décrites de façon séparée, les expérimentations et le terrain ont été réalisés parallèlement en s'alimentant mutuellement.

Partie empirique

ÉTUDE 1 : ANALYSE DU CONTEXTE D'USAGE, DES CARACTERISTIQUES DES UTILISATEURS ET DES BESOINS

L'étude a été menée auprès d'opérateurs en chimie de recherche et développement (R&D). L'enjeu était de comprendre leurs besoins et d'identifier un poste sur lequel une technologie cobotique pourrait venir appuyer l'humain dans son travail afin d'améliorer son bien-être et ses performances.

Cette partie débute par l'analyse de la demande pour mieux comprendre les besoins qui ont guidé l'intervention.

Chapitre 1. Analyse de la demande

Cette partie présente l'analyse de la demande qui a été effectuée. Le but de celle-ci a été de consulter tous les acteurs du projet afin de comprendre en profondeur les besoins de chacun pour orienter l'intervention de façon à ce qu'elle soit la plus bénéfique possible à l'organisation.

1.1. Demande liée à l'implémentation cobotique

Le projet PACBOT nécessitait un terrain d'étude prévoyant l'implémentation d'une technologie cobotique spécialement créée pour une situation de travail précise ; il s'agissait de centrer la conception sur une situation d'usage également appelé « cas d'étude » ou « *use case* » par les collègues roboticiens ou informaticiens. En amont de la création de cette technologie, les intervenants devaient identifier le poste de travail qui bénéficierait le plus de cette technologie. Ils devaient recueillir les besoins des opérateurs, et identifier les variabilités présentes dans la situation de travail.

Les managers du laboratoire de chimie R&D ont accepté de participer au projet PACBOT en tant que terrain d'étude dès la mise en place de celui-ci. En effet, des relations de collaboration étaient déjà présentes entre l'organisme porteur du projet et le laboratoire en chimie R&D via principalement du partage de connaissances et de ressources humaines. De ce fait, quand le porteur du projet PACBOT a contacté le laboratoire de chimie R&D, les managers ont rapidement accepté cette nouvelle collaboration.

Ce sont donc les managers du terrain d'étude qui ont décidé d'inscrire leur laboratoire au sein de ce projet. La direction du laboratoire, ainsi que le groupe auquel il appartient, soutiennent ce type d'initiatives de façon générale. En effet, ils souhaitent que le laboratoire rayonne le plus possible dans le monde de la recherche publique et privée. Leur participation à un projet de cette envergure était donc perçue pour eux comme très bénéfique.

Dès le début de la collaboration, les managers du laboratoire ont expliqué le projet et ses implications à tous les opérateurs du site. De même, les opérateurs potentiellement concernés par l'intervention ont pu rencontrer les futurs intervenants, à trois reprises (en visio et en distanciel) pour mieux les identifier et comprendre les objectifs visés (Cf. Annexe 2). Ces échanges préalables ont duré un an au cours duquel les contrats de collaboration ont été écrits et validés. Une fois les contrats définitivement approuvés, les intervenants ont pu se rendre sur le terrain d'étude.

Pendant les échanges préliminaires à l'intervention, les managers du terrain d'étude ont émis des demandes non directement reliées à l'implantation technologique. En effet, ils souhaitent mettre à profit l'intervention de psychologues du travail et d'ergonomes au sein de leur établissement afin d'identifier les forces et les faiblesses de leur laboratoire. Nous avons donc réalisé une analyse de la demande sur le terrain d'étude. Le but était de comprendre la demande issue du projet, ainsi que la demande hors projet. La méthode et les résultats de cette analyse sont présentés dans la partie suivante.

1.2. Demandes non liées à l'implémentation cobotique

L'analyse de la demande propre à notre terrain d'étude a été effectuée lors de la première semaine d'intervention sur le terrain d'étude (septembre 2022). Un premier entretien, réalisé avec les deux managers impliqués dans le projet depuis le début, a permis, en plus de mettre en lumière des demandes spécifiques, d'obtenir une vision plus claire du personnel de la structure afin d'organiser des entretiens avec les opérateurs représentatifs de chaque équipe de travail, de chaque statut, etc. Une liste des personnels rencontrés dans le cadre de l'analyse de la demande est précisée ci-dessous (Cf. Tableau 2)³³.

³³ Pour des raisons de protection des données personnelles, lorsqu'il est question d'opérateurs, le masculin sera privilégié peu importe le genre de la personne en question.

Tableau 2. Personnels rencontrés, nombre et durée des entretiens lors de l'analyse de la demande

Statut de la personne rencontrée	Nombre d'entretiens	Durée de l'entretien
Manager	2	35 minutes et 20 minutes
Cadre CSE	1	1 heure
Technicien CSE	1	1 heure
Responsable HSE	1	30 minutes
Responsable RH	1	20 minutes
Opérateur cadre	1	40 minutes
Opérateur technicien	1	1h15

Les demandes se sont avérées multiples et de grands thèmes s'en sont dégagés et constituent en cela un pré-diagnostic riche d'informations sur la structure et ses besoins :

- Une **sécurité** parfois défaillante et une **communication** non optimale avec l'équipe HSE

De récents incidents ont eu lieu en BAG et en Sorbonne. Les managers voudraient que les opérateurs se sentent en sécurité lorsqu'ils viennent travailler au laboratoire. De plus, une meilleure gestion de la sécurité par les responsables HSE est demandé par le personnel. En effet, il y a quelques tensions entre l'équipe HSE et le reste du personnel.

- **Des équipes multiculturelles**

Les managers ont parfois des difficultés à gérer leurs équipes, notamment lorsque celles-ci sont multiculturelles. Il y a des plaintes d'opérateurs liées à la charge de travail, à la pression et à la communication non appropriée de la part d'opérateurs plus expérimentés envers des opérateurs qui le sont moins. Certains opérateurs déclarent aussi qu'il y a des problèmes de communication entre les équipes.

- Un **manque de place** de stockage des produits suite aux fins de vie expérimentale

Les opérateurs interrogés notent pratiquement tous un manque de stockage des anciennes manipulations expérimentales. Certains déclarent que l'activité évolue en augmentant et qu'il faut donc agrandir le site. En effet, les processus créés ne sont plus utilisés une fois que le projet est terminé. Cependant, le matériel et les produits utilisés restent sur site et prennent de la place. Malgré le fait que ces problèmes sont régulièrement soulevés, la direction ne propose

aucun plan d'agrandissement.

- Des **techniciens** sans possibilité d'évolution professionnelle

Les techniciens perçoivent un manque de reconnaissance concernant leur carrière. Des grilles de salaire sont présentes mais difficilement applicables. L'évolution de carrière est compliquée, ce qui provoque des frustrations.

- La place des **RH** mal identifiée

Les opérateurs ne comprennent pas comment et par qui sont gérées les ressources humaines. Dès qu'ils ont une question RH, ils en réfèrent à leur manager car ils ne connaissent pas bien le responsable RH (ou deux) qui est rarement sur site.

- Des difficultés liées à la présence de nombreux **prestataires**

Le service HSE fait remarquer que de nombreux prestataires interviennent dans la vie quotidienne du laboratoire, notamment, au niveau de l'accueil et de certains travaux de nettoyage et de mise en sécurité. La communication est parfois difficile avec certains d'entre eux et ceci a des conséquences sur le travail du laboratoire, notamment dans la gestion des déchets. Par exemple, ces derniers doivent être évacués par un prestataire externe. Les opérateurs remarquent que cela n'est pas constamment fait et que les déchets s'accumulent. De plus, les déchets dits CMR, c'est-à-dire comportant des composés cancérogènes, mutagènes, reprotoxiques, sont stockés dans des sorbonnes spéciales qui doivent être fermées hermétiquement. Or, quand les opérateurs reviennent le lendemain, ils remarquent que la sorbonne est grande ouverte.

- Une **charge de travail** évaluée comme trop élevée

Les opérateurs déclarent que les managers semblent avoir une charge mentale assez élevée et s'en inquiètent. Concernant leur propre travail, ils le perçoivent comme intense et exigeant intellectuellement. Certains n'hésitent pas à intervenir auprès de leurs managers en exprimant un besoin de se décharger de toutes les charges annexes à la technique, notamment la gestion de projet, perçue comme trop énergivore.

- Un travail avec les **BAG et sorbonnes** peu apprécié

Les opérateurs déclarent que personne n'apprécie les projets en BAG et que ce sont

souvent les mêmes personnes qui se retrouvent à les accepter, dans la mesure où ils en deviennent experts. Le travail en BAG est perçu comme très contraignant... Les opérateurs évoquent les déplacements d'objets, le temps pour rentrer et sortir des produits et le nettoyage. De même, les opérateurs ont des douleurs au dos avec le travail de longue durée en sorbonne et en BAG. Les managers ont évoqué la possibilité d'implémentation un cobot sur ces postes.

Le recueil des besoins des différents acteurs du terrain d'étude a permis de formuler deux demandes distinctes qui sont présentées ci-dessous.

1.3. Reformulation des deux demandes

La partie précédente a permis de mettre en lumière deux demandes différentes. L'une de ces demandes est directement liée à une implantation technologique, l'autre demande est soulevée par les personnels du laboratoire de chimie R&D.

Nous avons reformulé la demande liée à l'implantation cobotique comme suit :

- 1. Trouver le **poste de travail** qui bénéficierait le plus de la mise en place d'une collaboration Humain/Cobot via une analyse de l'activité et relever les **variabilités** et les **besoins** présents sur ce poste.

Nous avons reformulé la demande issue non liée à l'implémentation cobotique comme suit :

- 2. Analyser les **forces et les faiblesses** de la structure pour identifier les **leviers** sur lesquels s'appuyer et les **contraintes** sur lesquelles il faudrait travailler afin d'améliorer les **conditions de travail**.

La présente reformulation a permis de dresser un plan d'action afin de le soumettre aux acteurs du projet. Ce plan est expliqué dans la partie suivante.

1.4. Comité de pilotage et plan d'action

Un comité de pilotage a été constitué afin de soutenir l'engagement pour le projet de la part de ses membres d'une part, mais aussi des autres personnels via la communication sur les actions menées. Ce comité a été proposé par l'équipe universitaire intervenante (psychologues et ergonomes), puis enrichi et validé par les managers. Il était constitué de deux managers, du directeur du site, du responsable RH, du responsable HSE, de deux membres du CSE (un cadre et un technicien), deux opérateurs (un cadre et un technicien), ainsi que de l'équipe des

intervenants. Ce comité a été souhaité et mis en place en début d'intervention, non sans avoir interrogé les personnels concernés de façon individuelle sur leur motivation à y prendre part.

Un plan d'action avec un rétroplanning a été créé, présenté et validé lors de deux réunions avec deux managers et deux opérateurs (Cf. Figure 24). Les acteurs n'ont rien imposé sur le fond de l'intervention, une grande liberté nous a été laissée. La seule contrepartie qui nous a été demandée est l'analyse des forces et des faiblesses du site dans un souci d'amélioration des conditions de travail.

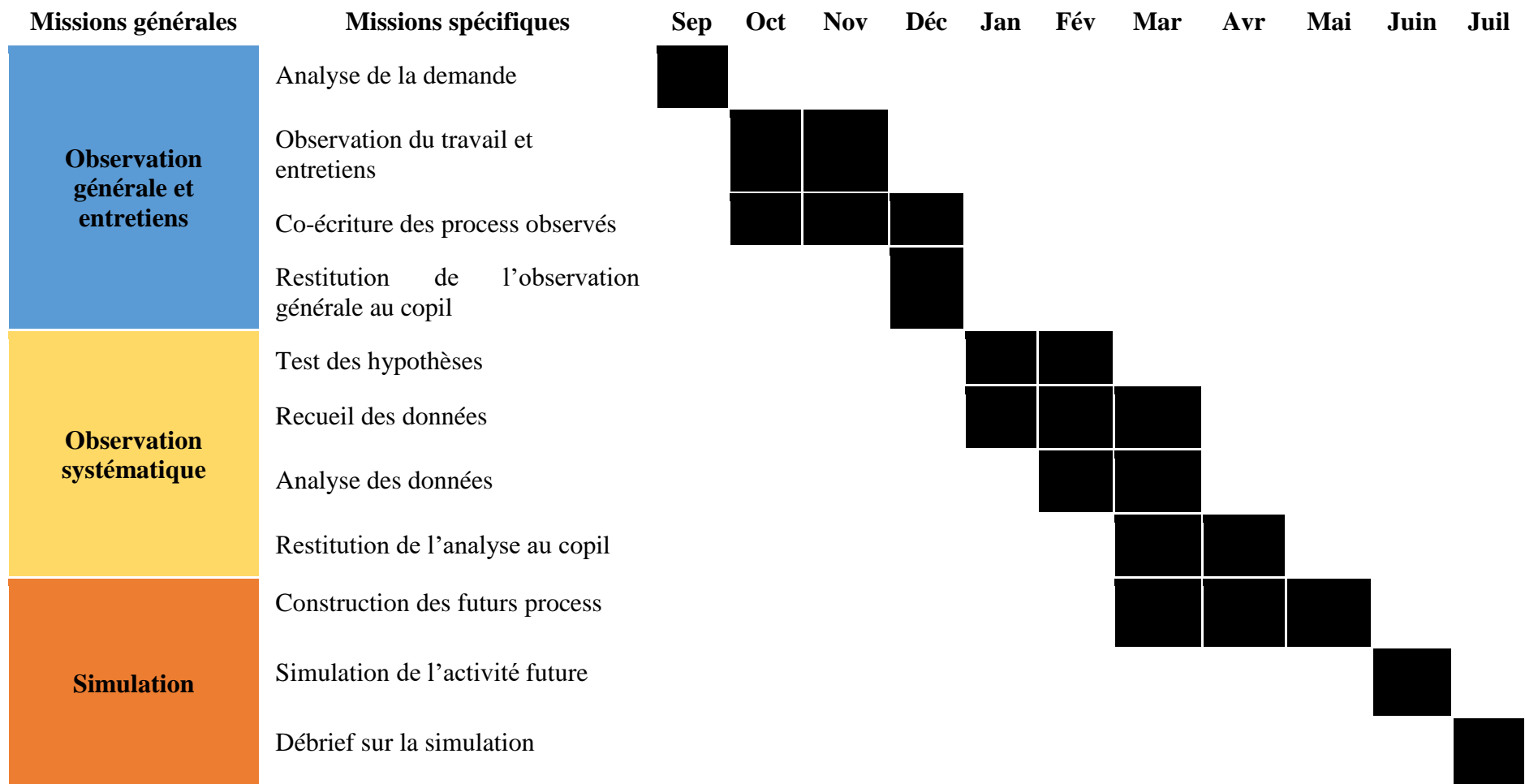


Figure 24. Plan d'action présenté au début du projet

Le plan d'action n'a pas pu être respecté dans sa globalité. En effet, nous avons rencontré des problèmes d'accès au terrain qui ont retardé l'avancement de l'intervention. Nous n'avons pas pu réaliser l'observation systématique et la simulation. Cependant, l'observation a pu être menée à bien et de nombreux entretiens ont été réalisés pour répondre à la demande du terrain. Concernant la demande liée à l'implémentation cobotique, de nombreuses observations plus localisées, des échanges et des entretiens ont été réalisés pour y répondre.

Chapitre 2. Analyse de l'activité via l'observation des postes de travail

Une analyse de l'activité au sein du terrain d'étude a été nécessaire afin d'observer toutes les situations de travail et prendre note de toutes les variabilités (qu'elles soient intra ou inter-individuelles, techniques et organisationnelles) jusqu'à saturation des données. Cette analyse de l'activité a poursuivi deux buts distincts. Premièrement, elle a permis d'identifier le poste de travail qui bénéficierait le plus de l'implémentation d'une technologie cobotique. Une fois ce poste identifié, elle a permis d'identifier toutes les variabilités présentes sur celui-ci, ainsi que les besoins des opérateurs. Nous avons également pu coconstruire (avec les opérateurs) les process de leur activité (méthode précise de réalisation du travail appelée également « arbres des tâches » en informatique) afin d'orienter la conception de la future collaboration H/C et de construire des scénarios de tests utilisateurs. Deuxièmement, cette analyse a permis de mieux comprendre l'organisation du travail du laboratoire afin d'identifier les points d'amélioration et les leviers de la structure.

L'analyse de l'activité a donné lieu à 11 jours complets d'intervention. Deux techniques ont été utilisées : l'observation des postes de travail, et l'entretien. A chaque première rencontre, l'étude, ses objectifs, ainsi que le traitement des données étaient présentés au participant. Suite à cette présentation, l'intervenant proposait au participant d'y participer. Après l'obtention du consentement éclairé de la personne, le participant et l'intervenant sélectionnaient une date et une heure pour l'(les) observation(s) et l'entretien.

2.1. Participants

11 opérateurs ont accepté d'être observés pendant leur travail pour une durée totale de 18 heures et 40 minutes. Les caractéristiques de ces opérateurs sont détaillées ci-dessous (Cf. Tableau 3).

Tableau 3. Caractéristiques des participants observés pour l’analyse de poste

Numéro opérateur	Poste	Genre	Taille approximative (en cm)	Age approximatif	Temps d’observation total
1	Externe	Masculin	185	30 ans	3h
2	Contractuel	Masculin	170	25 ans	3h
3	Cadre	Féminin	170	28 ans	1 heure
4	Cadre	Masculin	175	25 ans	20 minutes
5	Technicienne	Féminin	160	35 ans	3 heures
6	Technicien	Masculin	180	25 ans	30 minutes
7	Technicien	Masculin	170	55 ans	3h
8	Contractuel	Masculin	180	25 ans	3h
9	Externe	Féminin	170	33 ans	30 minutes
10	Cadre	Féminin	160	25 ans	30 minutes
11	Technicien	Masculin	175	25 ans	50 minutes

Certaines données sont « approximatives » (taille et âge) car la question n’a pas été posée directement aux opérateurs. Une majorité des participants sont de genre masculin (N = 7) avec une moyenne d’âge approximative de 30 ans et une moyenne de taille approximative de 172 centimètres. Tous les types de postes d’opérateurs ont été observés (externe, contractuel, cadre et technicien), sachant que certains d’entre eux ont été plus observés que d’autres. Cela fut un choix effectué pour répondre au mieux à la demande du terrain. Ce choix est expliqué dans la partie suivante.

2.2. Méthode

15 observations ont été réalisées auprès des 11 opérateurs volontaires renvoyant à 9 postes de travail. Elles ont duré au total plus de 18 heures. Certaines situations ont donné lieu à un nombre d’heures d’observation plus élevé que d’autres. Cela s’explique par l’analyse du Document Unique (DU) qui nous a orienté vers les postes les plus contraignants et à risques, à savoir ceux qui se situent dans les laboratoires contenant des BAG et des sorbonnes. Les observations se sont donc davantage concentrées sur ces postes, dits par la suite « postes d’intérêt » (Cf. Figure 25). Les activités liées à ces postes ont également été systématiquement filmées et photographiées.

Tableau 4. Présentation des postes observés et du temps d'observation

Numéro observation	Poste observé	Temps de l'observation
1	Programmation cobot	20 minutes
2	Manipulation BAG et sorbonne	1h30
3	Mesures BAG	1 heure
4	Tests manipulation avec cobot	2 heures
5	Tests protocole sur machine	30 minutes
6	Manipulation BAG et sorbonne	30 minutes
7	Manipulation BAG et sorbonne	1h
8	Manipulation et mesure BAG	2h
9	Nettoyage matériel	1h
10	Manipulation avec machine	3h
11	Inventaire matériel	1h
12	Manipulation sorbonne et paillasse	30 minutes
13	Manipulation sorbonne et paillasse	30 minutes
14	Tests manipulation avec cobot	20 minutes
15	Tests manipulation avec cobot	30 minutes

Les process ont pu être créés grâce à plusieurs techniques de recueil de données (Cf. Figure 25).

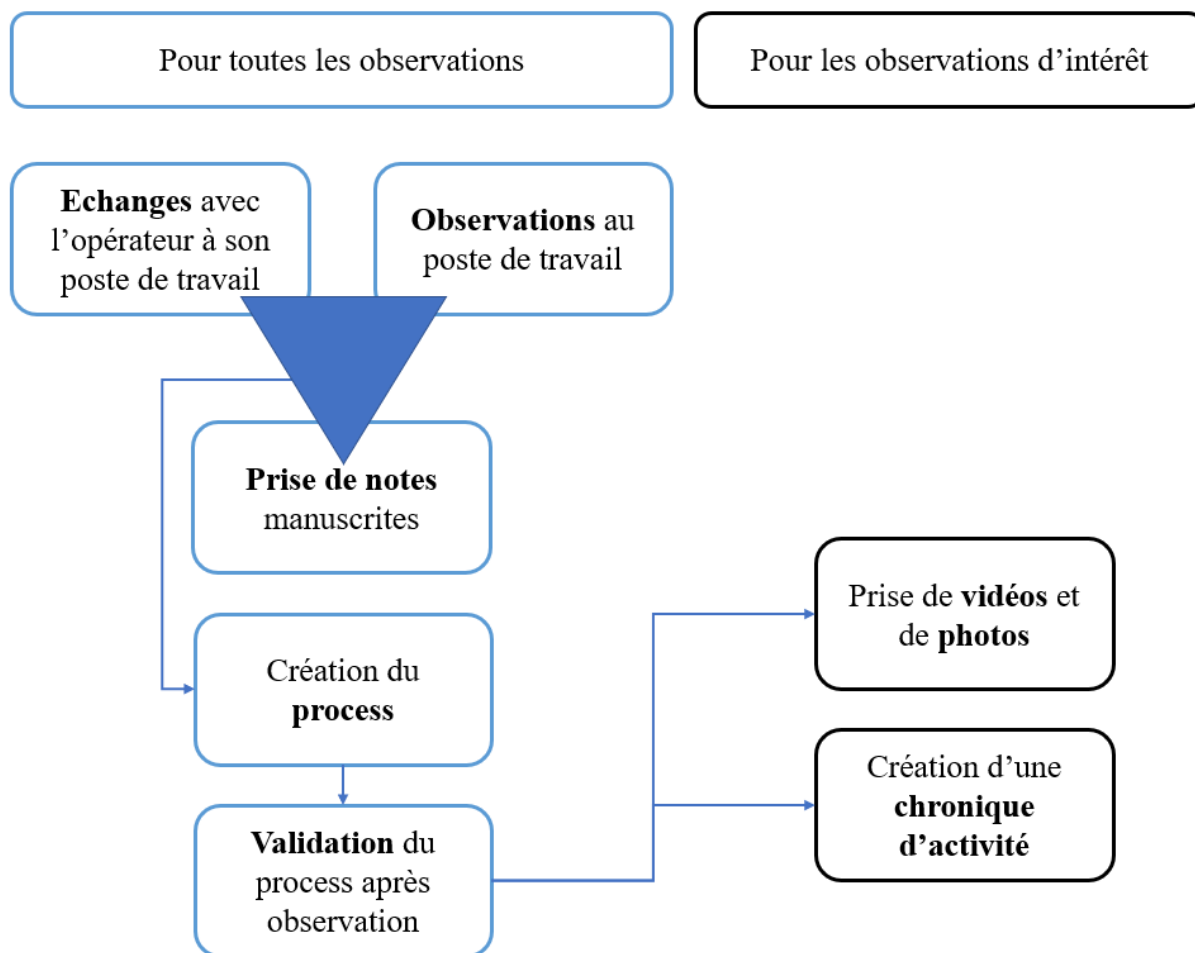


Figure 25. Techniques d'analyse de l'activité mobilisées dans l'étude

Lors des observations, certains opérateurs verbalisaient leurs actions. Pendant les tâches nécessitant de la concentration (selon l'opérateur observé), aucune parole n'était échangée, sinon, un échange entre l'opérateur et l'intervenant avait lieu. Celui-ci permettait de préciser les détails de la situation difficilement compréhensible par une simple observation. Pour certaines observations, des films et photos ont été réalisés afin de mieux apprécier les postures et les gestes des opérateurs. Grâce à ces nombreuses observations des postes et à une observation plus globale du site pendant toute la durée de l'intervention, les différents process ont été construits à l'aide du logiciel Demo (demo.bpmn.io) qui permet de créer des process visuels. Ces process sont discutés avec les opérateurs chimistes afin que ceux-ci puissent les corriger et les valider. Certaines activités ont été filmées. Toutes ont été accompagnées de notes manuscrites pendant l'observation.

Les process obtenus grâce à cette méthode ont été proposés aux opérateurs lors d'entretiens de debriefing qui consistaient à retracer verbalement l'activité observée et les choix des gestes et des décisions prises. Suite à cette validation, pour les postes d'intérêt, des

chroniques d'activité ont été réalisées sur une activité représentative du travail en BAG. Cette chronique a été réalisée avec l'aide du logiciel Excel pour pouvoir intégrer facilement les données extraites des films et des notes papiers.

Au fur à mesure des observations, les différentes variabilités ont été rigoureusement listées et triées par type de variabilité à l'aide de la classification précédemment établie (Cf. Section 3, Chapitre 2).

2.3. Résultats : Process du travail d'un chimiste en R&D

Les chimistes en R&D qui ont été observés suivent un cycle de travail particulier que nous allons développer dans cette partie et que nous illustrons par leurs propres verbatims entre guillemets et en italiques.

Premièrement, les chimistes débute un projet de développement d'un nouveau process qui a été commandé par des partenaires internes au groupe. La plupart des opérateurs ont fait part d'une certaine liberté dans leur choix de projet. Ils indiquent qu'une fois un projet fini, ils peuvent adresser leurs préférences à leur manager qui leur proposera un projet adapté à leur envie. Cependant, il est à noter que certains projets, notamment les projets en BAG, peinent à trouver des opérateurs : « *Personne n'en veut donc c'est toujours les mêmes qui se retrouvent à les faire* ». Les opérateurs ont souvent plusieurs projets à la fois, ce qui peut s'avérer difficile à gérer : « *jongler avec plusieurs projets c'est difficile, ça demande plus de concentration, j'essaye de me dédier des semaines à un projet mais c'est pas facile* ». Une fois le projet accepté, s'enchaînent des rencontres avec les différents partenaires afin d'établir la marche à suivre durant le projet ainsi que la demande précise. Pendant cette phase, l'opérateur s'applique à lire la littérature disponible sur le sujet concerné afin de proposer un process adéquat. Une fois ces deux étapes terminées, la liste est dressée des composants et molécules à utiliser. Cette liste est communiquée au service HSE et entrée dans un logiciel qui permet de faire la liste des bonnes pratiques et des dangers liés au produit concerné. L'opérateur travaille ensuite à définir le protocole expérimental qu'il va mettre en place afin d'obtenir le process voulu par le client. Ce protocole est discuté avec les managers, les membres du projet, ainsi qu'avec l'équipe HSE. Cette dernière va donner l'autorisation finale de débiter les expérimentations sous réserve de respecter les consignes qui ont été établies. L'opérateur doit ensuite trouver une zone expérimentale où s'installer afin de procéder à sa manipulation : « *On arrive avec une nouvelle manip' mais on peut s'installer nulle part parce que certaines personnes laissent leur matériel alors que leur manip' est finie, c'est source de tension au quotidien* ». Les opérateurs

commandent seuls leur matériel. Ils ont une grande marge de manœuvre et peuvent choisir les meilleurs équipements sans contrainte financière : « *On n'a pas de restrictions sur l'achat de matériel et ça change vraiment des autres labos* ». Ils peuvent finalement installer leur matériel avec l'aide de collègues (parfois non directement liés au projet) car ce type de matériel est souvent difficile à manipuler (poids, encombrement, etc.). L'opérateur va ensuite se former à l'utilisation de logiciels de recueil et de traitement des données avant de débiter la phase expérimentale.

Le deuxième stade du process global est la phase expérimentale. Les opérateurs font les tests nécessaires au développement du nouveau process commandé et ils testent différents process pour aboutir à celui qui satisfait le plus le client. Cette phase varie grandement de projet en projet. Bien que ce stade varie, l'itération est présente dans tous les projets. Il n'y a jamais un seul test. Les opérateurs reproduisent les manipulations des dizaines, parfois des centaines de fois, en modifiant de petits détails jusqu'à obtenir le process idéal. Durant cette phase, des comptes-rendus réguliers au client sont donnés et celui-ci demande parfois des changements pendant les expérimentations. Ces changements peuvent parfois donner lieu à des incompréhensions ou à des prises de risque. Pendant la période de notre intervention, un accident grave est arrivé à cause de cela. L'arbre des causes est remonté jusqu'à une demande du client d'augmenter la dose d'une substance. Cette demande est arrivée dans un contexte de pression temporelle alors l'opérateur a exécuté la demande sans repasser par la procédure habituelle de sécurité. Cela a provoqué l'explosion d'une sorbonne qui aurait pu, si quelqu'un avait été en face, être mortelle. Une fois le process robuste, les opérateurs l'exportent au client tout en l'accompagnant pour que le process soit réalisable pour les équipes finales. Ils informent le client des résultats à distance ou en présentiel au sein du laboratoire pour faire une démonstration du process final. Si celle-ci est assez convaincante pour le client, le process est exporté au groupe. Ici, ce n'est plus l'opérateur qui va exporter le process. En revanche, il est consulté pour que les méthodes soient bien respectées et pour que le process soit adapté si nécessaire au site d'accueil. A partir de cette phase, et si les conditions de confidentialité en donnent la possibilité, l'opérateur va valoriser sa recherche par une publication scientifique (ou dans de plus rares cas, en déposant un brevet). Le projet est donc officiellement fini et l'opérateur peut recommencer la même procédure avec un autre projet.

Grâce à nos observations, nous avons pu créer un process global du métier de chimiste en R&D (Cf. Figure 26).

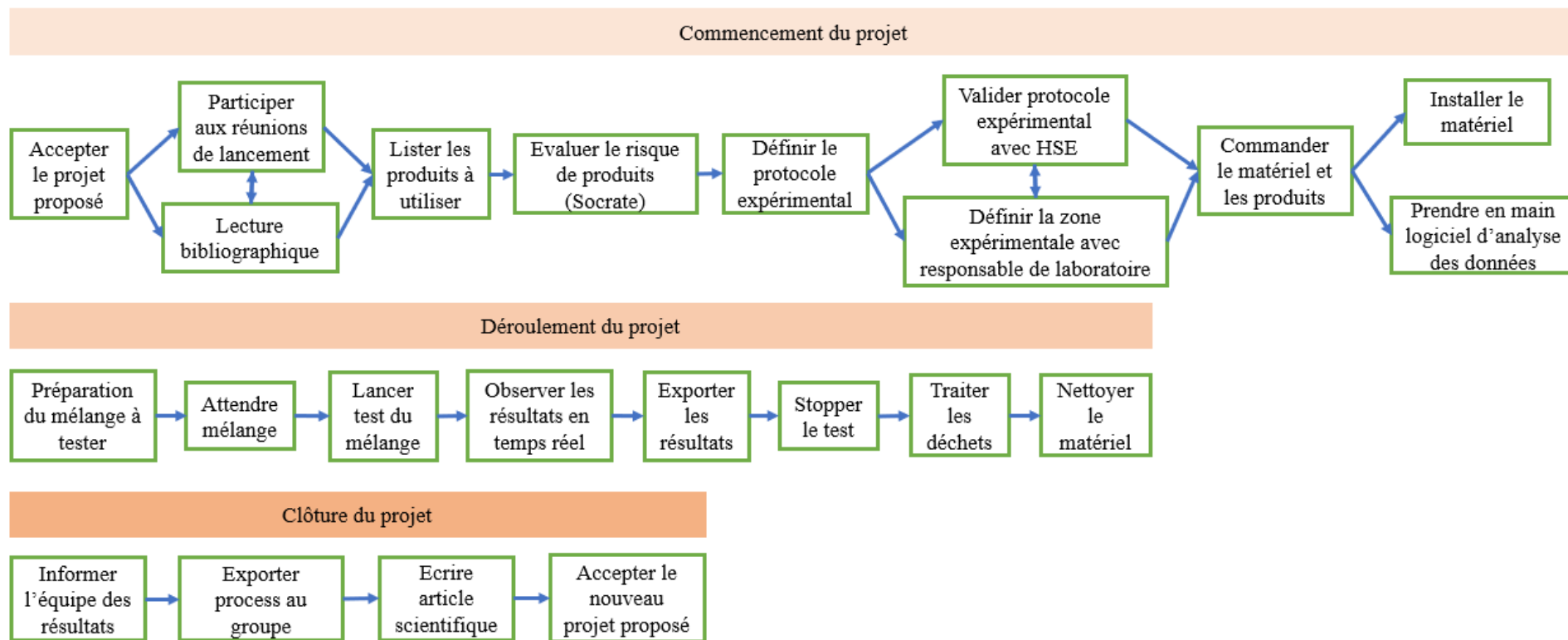


Figure 26. Process du travail d'un chimiste en R&D

Les observations (mais aussi les entretiens dont l'analyse sera présentée ultérieurement) nous ont permis d'obtenir de nombreux résultats intéressants au niveau des postes de travail. Elles nous ont ainsi permis d'identifier un poste de travail qui pourrait bénéficier d'une aide cobotique.

2.3.1. *Quel poste pour une collaboration H/C ?*

Le Document Unique (DU) réalisé en 2022 (année de notre intervention) nous a fourni de précieuses informations sur les différents risques et leur localisation.

Nous avons classé les différents risques en 10 catégories (Cf. Tableau 5).

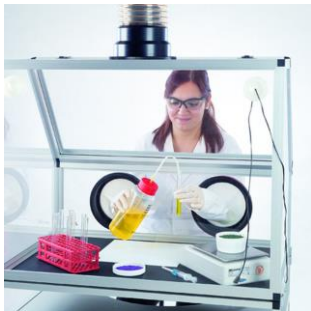

Tableau 5. Catégorisation et occurrences des différents risques trouvés dans le DU 2022

Catégorie du risque	Exemple	Nombre d'occurrences DU
Risques biologiques et chimiques	Contamination par agent chimique	52
Equipements	BAG, pressurisation, brûlure	40
Ambiance	Éclairage, bruit	23
Incendie	Produit inflammable	13
Charge mentale	Stress, harcèlement	12
Posture	Manutention, BAG, sorbonne	11
Chutes	Stockage en hauteur	10
Electricité	Contact équipement en tension	7

De nombreuses catégories de risque sont liées à l'utilisation d'équipement de type BAG et sorbonnes. Par exemple, les opérateurs déclarent que le stress ressenti est souvent lié à la manipulation de produits mortels. De même, le bruit est déclaré comme émanant des gros appareils de filtrage d'atmosphère, tels qu'on en trouve sur les BAG et les sorbonnes.

En regroupant les différentes informations extraites du DU sur la localisation des risques, leur origine et les informations récoltées lors des entretiens et des observations, il est apparu que les opérateurs travaillant en BAG et en sorbonne avaient un niveau d'exposition aux risques supérieurs aux autres opérateurs. Les risques de ces équipements sont listés dans le tableau ci-dessous (Cf. Tableau 6) :

Tableau 6. Liste des risques liés à l'utilisation de la BAG et de la sorbonne

Équipement concerné	Risques
<p>BAG</p>  <p>et sorbonne</p> 	<p>Stress dû à la manipulation de produits mortels</p> <p>Mauvaises postures (douleurs, gêne, danger sur long terme)</p> <p>Difficulté de déplacement</p> <p>Environnement surchargé</p> <p>Surcharge informationnelle</p> <p>Attention constante + nombreuses heures de travail = danger pendant manipulation expérimentale</p>
<p>Risques spécifiques à la BAG</p>	<p>Projets en BAG peu appréciés</p> <p>Équipements de Protection Individuelle inadéquats</p> <p>Mouvements non optimisés</p> <p>Déplacements difficiles</p>

Ces observations nous ont conduit à nous focaliser sur les postes des opérateurs travaillant en BAG et en sorbonne. Les risques sont plus nombreux en BAG, nous décidons d'orienter notre analyse sur les postes qui utilisent cet équipement. Nous avons observé l'activité des opérateurs en BAG jusqu'à saturation des données.

Nos situations d'intérêt sont sélectionnées en fonction des analyses préliminaires. Il convient à présent de s'interroger sur le process prescrit du travail en BAG. Celui-ci est présenté dans la prochaine partie.

2.3.1.1. Quel est le travail prescrit ?

A notre demande, les managers nous ont fourni un process de BAG (Figure 27).

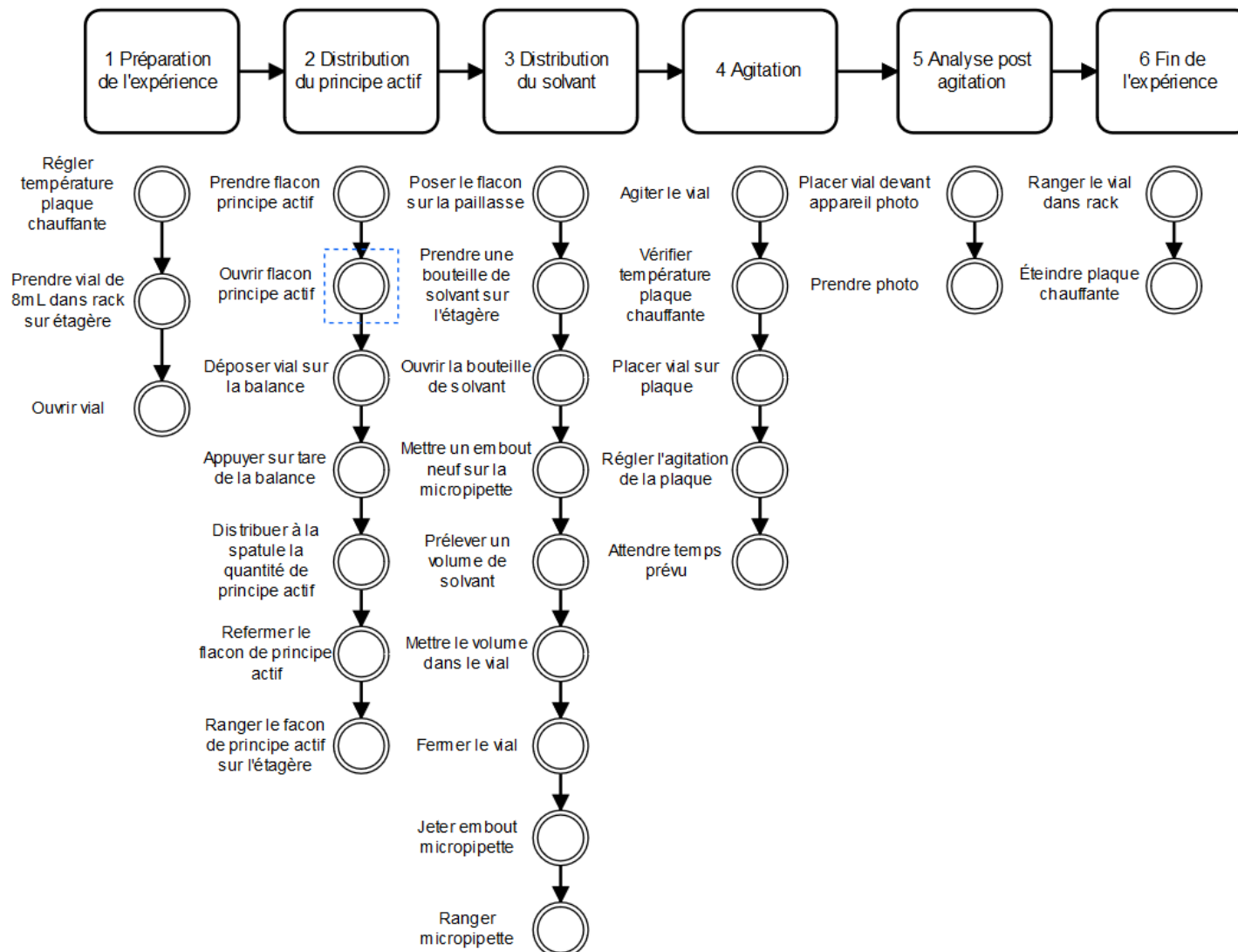


Figure 27. Process prescrit fourni par les managers des opérateurs en BAG

On remarque que le process fourni s'attache à décrire en détail les différentes actions effectuées par l'opérateur. Il apparaît comme une liste plutôt exhaustive des opérations. En effet, celui-ci prend en compte la manipulation de façon globale, de la préparation du matériel à son rangement du matériel. On note également la prise en compte de l'attente des résultats de la manipulation.

Il apparaît maintenant essentiel de confronter ce process théorique au process réel en observant directement les opérateurs travailler en BAG. Le résultat de cette observation, sous forme de process, est détaillé dans la partie suivante.

2.3.1.2. Quel est le travail réel ?

Notre analyse de l'activité des opérateurs en poste de travail BAG (Cf. Étude 1, Chapitre 2, p. 124) a permis d'obtenir un process réel quelque peu différent de celui fourni par les managers (Figure 28).

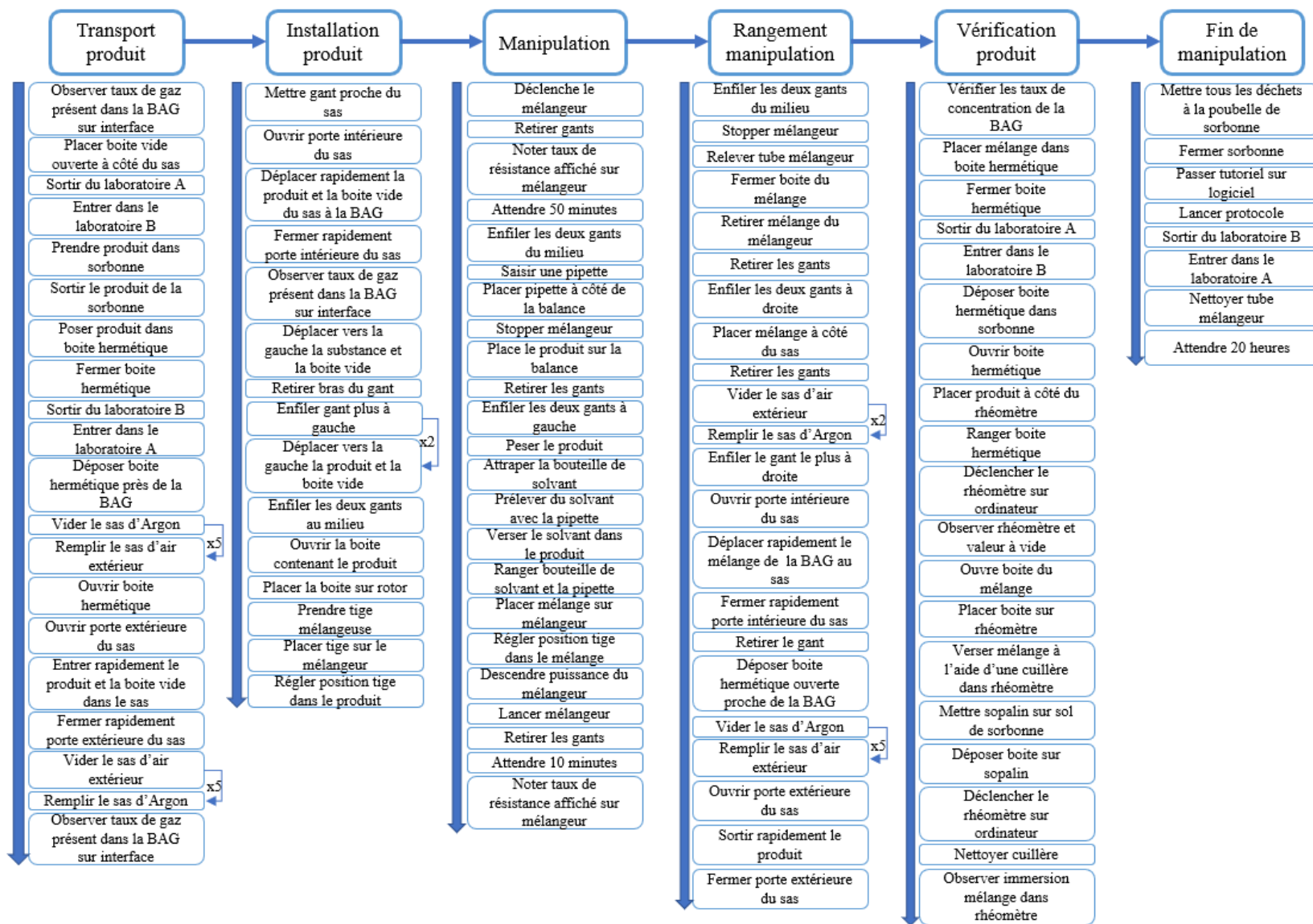


Figure 28. Process réel d'un poste de travail en BAG

Ce process nous permet de mieux comprendre le travail concret d'un opérateur en BAG travaillant dans un laboratoire de chimie R&D. La tâche d'un opérateur commence toujours par le transport des produits nécessaires pour effectuer la manipulation. Ce transport comprend les déplacements entre les laboratoires et les entrées et sorties en BAG (avec manipulation de l'atmosphère du sas d'entrée). Une fois les produits nécessaires dans la BAG, les opérateurs doivent prendre le temps de les déplacer petit à petit (les déplacements sont compliqués par l'utilisation des gants) et de les positionner selon le besoin. Ensuite, la manipulation expérimentale peut véritablement débuter. Il s'agit souvent de mélange de produit à l'aide d'un rotor mélangeur. Le solvant est d'abord chauffé, puis le produit est ajouté et le mélange est déclenché à l'aide du rotor qui va continuer à tourner jusqu'à la fin du chronomètre. Après avoir mélangé le produit, l'opérateur va stopper la manipulation et sortir le produit obtenu de la BAG en suivant le protocole de sécurité. Le produit est amené ensuite dans un autre laboratoire, sous sorbonne, afin de vérifier les données grâce à un appareil de mesure. L'opérateur va ensuite retourner dans la BAG afin de ranger et de nettoyer le rotor. Ce nettoyage est réalisé de manière différente selon l'expertise de l'opérateur. Les experts laissent tourner le rotor dans le solvant pendant la phase de vérification afin de le « pré-nettoyer » pour que le nettoyage dure moins longtemps. Les non-experts ne le font pas, leur activité de nettoyage dure donc plus longtemps.

Une chronique de l'activité a été réalisée, à l'aide du logiciel Open Source BORIS, sur la base d'une observation représentative du travail en BAG. Elle reprend le process présenté précédemment. Une partie du process a pu être filmée. La représentation graphique présente tout le process car celui-ci a fait l'objet d'une prise de note et d'un film (Figure 29).

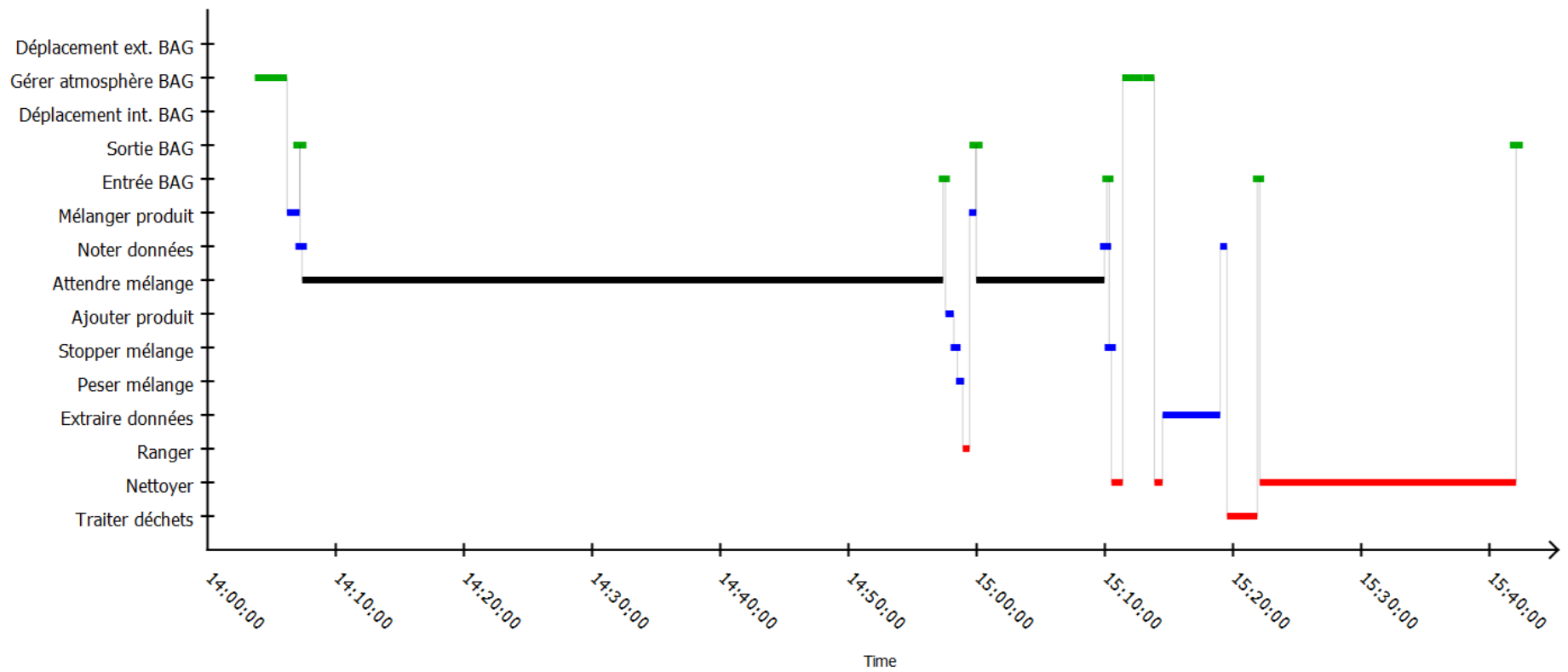


Figure 29. Chronique d'activité d'une activité en BAG réalisé par un opérateur expert

Au total, l'activité représentée ci-dessus a duré environ 1h43. Sur ce temps, 60 minutes ont été allouées à l'attente du mélange, environ 10 minutes pour les déplacements, les entrées et la gestion de l'atmosphère, environ 9 minutes pour la manipulation expérimentale en elle-même, et environ 24 minutes pour le rangement et le nettoyage.

On trouve plusieurs écarts entre la tâche prescrite et l'activité réelle :

- L'entrée et la sortie de la BAG, et gestion de l'atmosphère
- Les déplacements dans la BAG
- Les déplacements hors BAG
- L'observation des résultats
- Le nettoyage de la BAG et des machines utilisées (cette activité prend plus de temps que la manipulation expérimentale)

Ces tâches invisibilisées ont des impacts sur les opérateurs. Ceux-ci sont détaillés dans la partie suivante.

2.3.2. *Conséquences de l'écart entre prescrit / réel*

Il y a 5 tâches qui sont invisibilisées dans le process théorique fourni par les managers.

Premièrement, l'**entrée** et la **sortie** en BAG avec la **gestion de l'atmosphère** ne sont pas rapportées dans le process. Or, cette activité est particulièrement complexe (gestion de gaz atmosphérique) et difficilement accessible (tout a lieu dans un tuyau d'entrée / sortie étroit). Aussi, sa réalisation prend un certain temps (entre 1 et 3 minutes pour chaque entrée et sortie d'un produit). Certains opérateurs préfèrent donc prendre plus de risques plutôt que de faire entrer dans la BAG un matériel qui les sécuriserait (ex : l'opérateur choisit de frotter les tiges coupantes directement avec un sopalin plutôt qu'avec une brosse). Cette activité peut exposer l'opérateur à un risque qui pourrait être évité. Il convient donc d'en faire part aux managers et de discuter des pratiques avec le comité de pilotage. Un cobot pourrait potentiellement soulager l'opérateur de cette activité. En effet, si le cobot la prenait en charge, l'opérateur pourrait se focaliser sur les activités qui ont de l'importance pour lui et qui font son cœur de métier (e.g. la manipulation expérimentale en elle-même). Dans ce cas-là, on aurait une meilleure acceptation du système cobotique selon le modèle de l'acceptation située de Bobillier Chaumon (2016). En effet, dans ce modèle, l'auteur évoque une dimension de l'acceptation qui est liée à la perte de sens au travail de par le non-respect des règles du métier : la dimension professionnelle et identitaire. Cette dimension, grâce à l'intervention du cobot, serait plus positivement évaluée. Aussi, Par la prise en charge d'une activité contraignante, la collaboration humain/cobot

améliorerait aussi l'évaluation de la dimension individuelle par la diminution de la charge de travail de l'opérateur.

Deuxièmement, les **déplacements** à l'**intérieur** de la BAG n'ont pas été rapportés dans le process théorique. Ils sont particulièrement restreints par le manque d'espace à l'intérieur de la BAG et l'utilisation des gants de la BAG. En effet, mettre un gant de BAG est compliqué (plus de 10 secondes pour un expert) à cause de la pression à l'intérieur de la BAG. Les gants sont projetés à l'extérieur par la pression, l'opérateur doit donc prendre le temps d'entrer ces cinq doigts en même temps puis d'enfoncer son bras. Le plastique colle sur la peau, rendant difficile la réalisation de l'action. Pour bien mettre les gants, il faut enfoncer tout son bras, parfois jusqu'à l'épaule, dans le trou de la BAG. Pour les opérateurs de plus d'1 mètre 75, cela occasionne des torsions dorsales de par la position des trous. Pour les opérateurs de moins d'1 mètre 70, il faut enfoncer son bras jusqu'à l'épaule tout en poussant fort pour que le gant se positionne bien. Ce n'est pas une tâche appréciée par les opérateurs. Il faut parfois répéter la tâche de nombreuses fois pour déplacer les objets à l'intérieur de la BAG. En réalisant cette action, les bras frôlent les différentes étagères de rangement à l'intérieur de la BAG. Des chutes sont communes ce qui présente un risque de mélange de produits toxiques et/ou un allongement du temps de nettoyage. Un cobot pourrait être utile pour réaliser les déplacements à l'intérieur de la BAG. Cela limiterait les postures indécrites de l'humain et optimiserait la réalisation de l'activité. Si le cobot prenait en charge ces déplacements, l'évaluation de la dimension organisationnelle du modèle de l'acceptation située s'en trouverait améliorée (Bobillier Chaumon, 2016). En effet, la collaboration humain/cobot permettrait à l'humain une meilleure régulation de son activité (rapidité et praticité de déplacement du matériel), ainsi qu'une plus grande autonomie (un opérateur trop petit n'aurait pas besoin de dépendre d'un autre opérateur pour obtenir le produit).

Troisièmement, les **déplacements** à l'**extérieur** de la BAG ne sont pas décrits dans le process théorique. Il s'agit pour les opérateurs d'aller chercher un produit en sorbonne, de se déplacer dans les différents laboratoires, etc. Le temps passé à se déplacer n'est pas négligeable, bien qu'il ne constitue qu'une petite partie du temps total de l'activité. Cette activité comporte cependant un danger : exposer les autres opérateurs (et soi-même) à des produits dangereux. En effet, pour déplacer un produit, l'opérateur le met dans une boîte hermétique, sort du laboratoire des BAG, traverse les espaces communs, entre dans le laboratoire des sorbonnes, dépose la boîte dans une sorbonne puis sort le produit. Pendant ce laps de temps, si la boîte n'est pas bien fermée, ou s'il y a des produits sur les EPI de l'opérateur, une contamination est possible. De plus, les bureaux où les opérateurs travaillent sans EPI sont laissés ouverts sur les espaces

communs, ils sont donc particulièrement vulnérables à une contamination. Cependant, les déplacements à l'extérieur de la BAG sont appréciés par les opérateurs en ce qu'ils leur permettent de se dégourdir les jambes et de changer de postures. Ils vivent cela comme un temps de pause active. Il n'est donc pas envisageable de les en priver en utilisant un cobot. Si un cobot prenait en charge cette activité, la dimension individuelle du modèle de l'acceptation située (Bobillier Chaumon, 2016) risquerait d'avoir une évaluation négative. En effet, il pourrait provoquer une intensification de l'activité, en enlevant cette pause active aux opérateurs. Également, ceci diminuerait l'évaluation de la dimension professionnelle et identitaire car la collaboration cobotique amènerait à une activité empêchée, contrariée par l'usage du cobot.

Quatrièmement, l'observation des résultats n'est pas incluse dans le process théorique. Cependant, elle est cruciale pour obtenir des résultats fiables. En effet, elle est concomitante à la manipulation expérimentale. Les opérateurs observent directement le résultat pendant qu'ils manipulent. Parfois, ils perçoivent directement que les résultats sont mauvais et ils arrêtent directement l'expérience afin de ne pas perdre de temps. Ils ont donc une attention soutenue et parfois des postures indécrites pour parvenir à observer comment évolue leur manipulation. L'orientation de la fenêtre de la BAG et son encombrement rend difficile cette observation. Un cobot pourrait éventuellement aider à rendre plus visible les résultats ou à communiquer directement ceux-ci. En aidant l'opérateur de cette façon, le cobot pourrait améliorer la dimension individuelle du modèle de l'acceptation située (Bobillier Chaumon, 2016) en soulageant la charge de travail et les contraintes limitant la bonne lecture de la situation de l'humain.

Cinquièmement, le nettoyage n'est pas rapporté dans le process. Or, la chronique d'activité illustre que c'est l'une des tâches les plus chronophages du process réel. Le **nettoyage** est plus de deux fois plus long que la manipulation expérimentale elle-même. De plus, c'est une activité particulièrement dangereuse. En effet, les opérateurs s'exposent à des coupures et à des contaminations aux produits toxiques. En effet, les EPI sont mal (ou pas) portés par la majorité des opérateurs. Ceux-ci doivent, dans l'idéal, porter quatre gants différents pour nettoyer les équipements coupants. Ils portent des gants chirurgicaux, obligatoires en laboratoire peu importe l'activité. Par-dessus ces gants, ils portent les gants intégrés à la BAG qui sont épais et larges. Or, lorsqu'ils nettoient un équipement coupant, ils doivent mettre un gant anti-coupure (épais et étroit), puis un gant qui protège des liquides collants et toxiques. Ces deux derniers gants sont extrêmement difficiles à mettre, voire impossibles pour certains opérateurs. Pour ceux qui parviennent à les mettre, leur préhension fine est si diminuée, qu'ils n'arrivent plus à nettoyer finement leur équipement. C'est donc naturellement qu'une majorité d'opérateurs

décident de ne pas les porter au risque d'augmenter leur exposition à des produits dangereux. Un opérateur expert nous assure qu'il suffit de « faire gaffe » pour se passer des gants. L'implémentation d'une collaboration cobotique pourrait soulager l'opérateur humain de cette tâche. Cela permettrait aussi d'améliorer la dimension individuelle du modèle de l'acceptation située (Bobillier Chaumon, 2016). En effet, une aide cobotique pour le nettoyage diminuerait la charge de travail de l'opérateur. De plus, cet aide augmenterait aussi la dimension professionnelle et identitaire en permettant à l'humain de se concentrer sur les activités qui font sens pour lui (e.g. la manipulation expérimentale) et de passer moins de temps sur des activités annexes (e.g. nettoyage).

L'écart important entre la tâche prescrite et la tâche réelle n'est donc pas sans conséquences. On remarque qu'une grande partie de la manipulation expérimentale est invisibilisée pour ne garder que l'aspect « scientifique » de la manipulation en laissant de côté l'aspect technique et logistique. Cependant, les activités invisibilisées mènent à des expositions aux risques, plus ou moins conscientes de l'opérateur. La partie suivante traite du processus décisionnel en amont de l'exposition au risque.

2.3.3. *Prise de risque*

L'activité des chimistes en R&D les amène à être exposés à de nombreux risques. En effet, même en respectant les procédures de sécurité et en portant les EPIs adéquats, le risque est toujours présent (qu'il soit biologique ou d'une autre nature). Premièrement, les **équipements** utilisés sont très contraignants. Les BAG forcent les opérateurs à rester debout et à adopter des postures inconfortables parfois sur de longues périodes. En effet, les opérateurs de plus d'1m75 doivent écarter les jambes pour avoir les mains dans l'axe des trous à gants ; ils ont des difficultés à saisir des objets proches de la vitre et doivent maintenir la tête penchée vers l'avant pendant de longues minutes pour avoir une bonne visibilité. De même, les opérateurs d'1m70 ou moins doivent maintenir une flexion des épaules pour garder leurs bras dans l'axe des trous à gants et ont de grosses difficultés à saisir les objets en hauteur, ce qui les pousse à se contorsionner. Cette contorsion provoque des gestes brusques qui font parfois chuter des objets alentours. Les torsions du cou et du dos sont courantes ainsi que les flexions des épaules et des jambes. Ceci amène un risque de développer des TMS.

Les opérateurs ont aussi des difficultés à utiliser tous les EPI recommandés. Par exemple, la tâche de nettoyage de machine après manipulation requiert souvent d'être en contact avec un produit toxique et collant, ainsi qu'avec une tige en métal coupante comme

nous l'avons vu précédemment. Dans ce contexte, idéalement, quatre gants différents devraient être portés par l'opérateur mais la plupart choisit de n'en porter que deux, au risque de se mettre en danger. Un accident pourrait arriver facilement : une coupure pourrait provoquer la contamination (potentiellement mortelle) de l'air extérieur et de l'opérateur ainsi qu'une plaie ouverte de la main.

Pendant la phase d'analyse, un accident a eu lieu dans une des sorbonnes. L'entretien avec la personne ayant déclenché l'accident a permis de mieux comprendre l'origine de l'accident. La veille, les clients avaient demandé d'augmenter la concentration d'un produit dans le mélange de l'opérateur. La date butoir étant proche, l'opérateur s'est exécuté sans refaire une vérification de sécurité du produit avec les nouvelles concentrations. Il ne pensait pas que cette nouvelle concentration allait provoquer une réaction différente. Cependant, la sorbonne a explosé sous l'effet du mélange. Cela aurait pu blesser un opérateur si celui-ci avait été en face de la sorbonne en question. Le risque évolue toujours dans le temps d'un projet de création de process chimique (il est au plus haut lors du test de nouveaux composants, et bas lors de la solidification d'une méthode qui marche, etc.). Mais ce risque peut augmenter drastiquement sous l'effet d'une décision d'un opérateur (Figure 30).

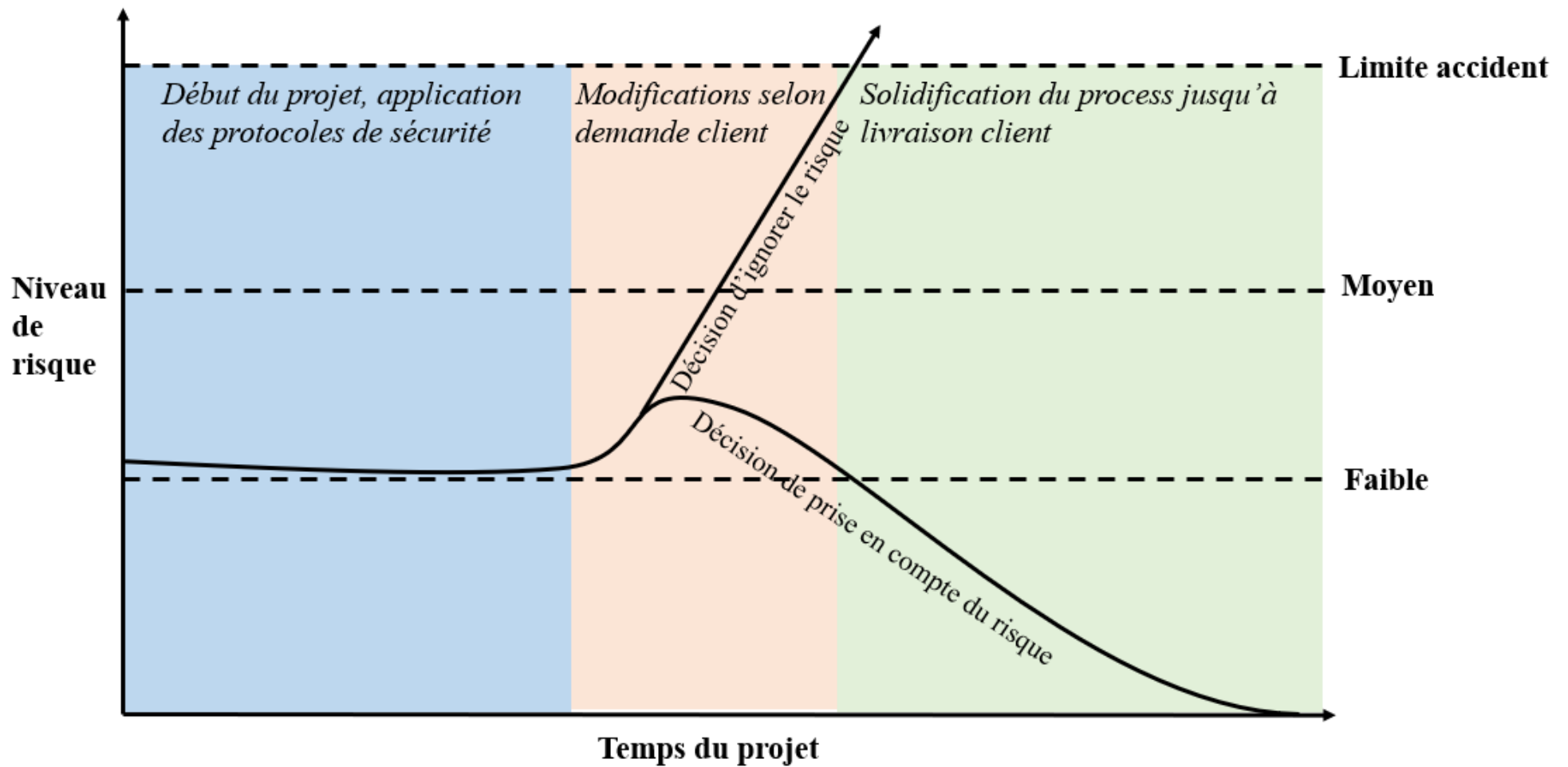


Figure 30. Évolution du niveau de d'exposition aux risques selon la temporalité du projet et la décision de l'opérateur inspiré de Girard (à paraître)

L'opérateur semble avoir eu un défaut de perception du risque dans la situation, ce qui a mené à sa prise de risque. Les causes sont donc multiples : pression du client, défaut d'encadrement des experts projet, délai de projet trop court, manque de connaissance de l'opérateur, choix risqué de l'opérateur. Il est à noter que toutes les causes identifiées sont des variabilités issues de la situation de travail. La figure suivante présente les différentes variabilités qui peuvent influencer la prise de risque (Cf. Figure 31). La ligne rouge illustre le cas de prise de risque qui vient d'être illustré.

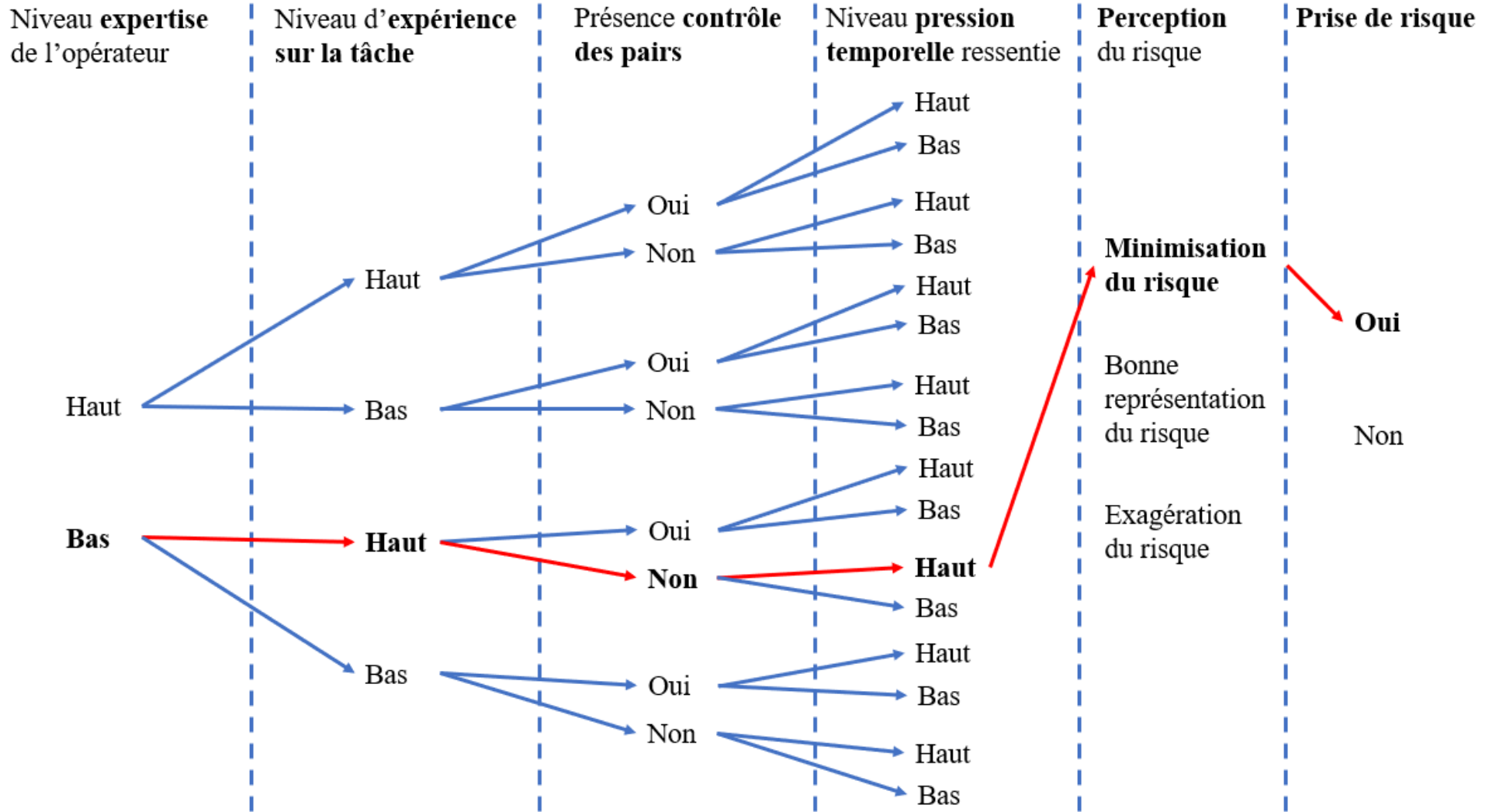


Figure 31. Prise de risque de l'opérateur en fonction de variabilités internes et externes de la situation de travail (traits bleus = possibilités, traits rouges = cas observé)

Potentiellement influencé par les différentes variabilités illustrées précédemment, l'opérateur a choisi de prendre un risque pour répondre aux demandes du client. Un cobot pourrait intervenir et prendre en compte certaines de ces variabilités afin d'éviter des prises de risque. La partie suivante détaille les variabilités identifiées sur le terrain d'étude.

2.3.4. Quelles variabilités utiliser pour les tests utilisateurs ?

Nous avons identifié de nombreuses variabilités sur le terrain d'étude (Cf. Tableau 7). Nous avons sélectionné plusieurs variabilités que nous avons pu utiliser lors de nos TUs. Elles ont été sélectionnées par leur simplicité d'implémentation dans le dispositif expérimental.

Tableau 7. Liste des variabilités identifiées sur le terrain, leurs effets et leur utilisation dans les TUs (en vert = déjà utilisées dans un TU)

Type de variabilités	Variabilités identifiées sur le terrain	Testées dans TUs	Effets identifiés sur les opérateurs et leurs activités
Variabilités techniques	Type de laboratoire	NON	Pas d'effet identifié
	Dangerosité des produits	OUI	Effet négatif : risque augmenté
	Texture du produit	NON	Effet négatif : temps allongé
	Etat du produit (liquide, solide, gazeux)	NON	Effet négatif : temps allongé
	Propreté des équipements	NON	Pas d'effet identifié
	Température du laboratoire	NON	Effet négatif : inconfort
	Encombrement des équipements	NON	Effet négatif : risques
Variabilités organisationnelles	Marge de manœuvre du projet	OUI	Pas d'effet identifié
	Type de projet de recherche	NON	Pas d'effet identifié
	Coactivité dans l'espace de travail	OUI	Effet négatif : risques
	Disposition de l'espace de travail	NON	Pas d'effet identifié
	Présence de la hiérarchie	NON	Effet négatif : inconfort
Intra individuelles	Connaissances techniques	OUI	Pas d'effet identifié
	Perception de la sécurité	NON	Effet négatif : risques
	Fatigue	NON	Pas d'effet identifié
	Stress	NON	Pas d'effet identifié
	Charge mentale	OUI	Effet négatif : risques
Inter individuelles	Taille	NON	Effet négatif : inconfort
	Genre	OUI	Pas d'effet identifié

Main dominante	OUI	Pas d'effet identifié
Formation	NON	Pas d'effet identifié
Expérience sur la tâche	OUI	Effet négatif : temps allongé
Expérience dans l'entreprise	NON	Pas d'effet identifié

Ce tableau illustre toutes les variabilités qui ont déjà été prises en compte dans la construction des TUs. Beaucoup de variabilités n'ont pas encore été prises en compte du fait de difficultés techniques et du temps limité du projet, mais cela dresse plusieurs perspectives pour de futurs travaux.

La partie suivante présente les résultats obtenus grâce aux entretiens réalisés sur le terrain d'étude.

Chapitre 3. Analyse de l'activité via les entretiens

Des entretiens ont été menés sur le terrain d'étude afin de compléter l'analyse de l'activité. Pour rappel, ceux-ci avaient pour objectif de mieux appréhender le vécu des opérateurs au sein du laboratoire afin de pouvoir dresser les forces et les faiblesses de l'organisation du travail.

3.1. Procédure de recrutement et participants

Les participants ont été recrutés soit directement par nous-même sur site, soit par email, soit les deux. L'intervention a duré quatre semaines avec des visites espacées d'un mois. Le but était d'arriver à rencontrer une majorité d'opérateurs. Lors de chaque nouvelle rencontre, Nous expliquions les raisons de notre présence et le but de l'étude. Nous décrivions ensuite le déroulement des entretiens (Cf. Annexe 3). Après cette explication, nous laissons le choix aux opérateurs de faire partie ou non de l'étude en participant à un entretien. Le choix n'était pas attendu de façon immédiate, un temps de réflexion était laissé aux participants. Malgré les nombreux jours de présence, certains opérateurs n'étaient pas sur site malgré leur envie potentielle de participer à l'étude. Pour pallier ce problème, la liste des emails de tous les opérateurs nous a été fourni afin que nous puissions les contacter. Nous avons donc envoyé un email explicatif (liée à notre présence et aux objectifs de l'étude) à tous les opérateurs du site afin de leur proposer de participer à un entretien individuel. Les volontaires se sont manifestés d'eux-mêmes, soit en se rendant à la salle qui nous avait été attribuée, soit en nous répondant par mail. Nous les renseignions alors sur le déroulement des entretiens et sur la confidentialité des données recueillies. Dans la mesure du possible, la majorité des opérateurs ont été interrogés, quel que soit leur poste (ingénieur, chercheur), leur qualification (sciences informatiques, sciences du vivant, etc.), leur statut (cadre, technicien) ou leur type de contrat

(externe ou interne, contractuel, permanent). Sur les 69 adresses mails qui nous ont été transmises par les managers, 61 personnes ont pu être contactées. En effet, certaines personnes issues des services support n'ont pas été contactées car elles étaient rarement sur site et ne participaient pas vraiment au travail sur le terrain. Parmi les 61 personnes contactées, 34 ont répondu positivement à l'appel de participation. En effet, 56% étaient d'accord pour un entretien, 3% ont refusé par manque de temps et 41% n'ont pas répondu. La totalité des volontaires ont été interrogés. Ci-dessous, la liste des participants interrogés (Cf. Tableau 8).

Tableau 8. Caractéristiques des participants interrogés

Type de poste (au masculin pour confidentialité)	Spécificité (au masculin pour confidentialité)	Ancienneté sur site (au moment de l'entretien)
Technicien	Responsable CSE	7 ans
Technicien	Informaticien	14 ans
Technicien	Chimiste	6 ans
Technicien	Chimiste	7 ans
Technicien	Chimiste	7 ans
Technicien	Chimiste	10 ans
Technicien	Chimiste	11 ans
Technicien	Chimiste	9 ans
Technicien	Chimiste	2 ans
Technicien	Chimiste	10 ans
Contractuel	Doctorant	1 an et 6 mois
Contractuel	Post-doc ingénieur	3 ans et 6 mois
Contractuel	Post-doc ingénieur	1 an
Contractuel	Post-doc ingénieur	2 mois
Contractuel	Doctorant	8 mois
Externe	Ingénieur	11 mois
Alternant	Equipe HSE	1 an et 1 mois
Cadre	Ingénieur	4 ans
Cadre	Responsable CSE	Pas d'information
Cadre	Managers	18 ans
Cadre	Managers	5 ans
Cadre	Directeur de site	18 ans

Cadre	Ingénieur	17 ans
Cadre	Responsable HSE	2 ans
Cadre	Ingénieur	25 ans
Cadre	Ingénieur	15 ans et 1 mois
Cadre	Ingénieur	13 ans
Cadre	Ingénieur	4 ans et 6 mois
Cadre	Ingénieur	1 an
Cadre	Ingénieur informaticien	2 ans
Cadre	Ingénieur	9 ans
Cadre	Ingénieur	8 ans
Cadre	Ingénieur	4 ans
Cadre	Responsable RH	1 mois

La moyenne d'ancienneté sur le poste est d'environ 7 ans. Parmi les participants aux entretiens, la répartition entre les cadres et les techniciens n'est pas équitable (Cf. Figure 32). Cela peut peut-être s'expliquer par la plus grande disponibilité des cadres qui sont, en moyenne, moins pris par des manipulations expérimentales. Également, on remarque que peu de contractuels, alternants et externes ont été interrogés comparativement aux autres types de postes. Cela s'explique par leur plus faible représentation sur le site. En effet, ils font partie d'une minorité au sein du laboratoire.

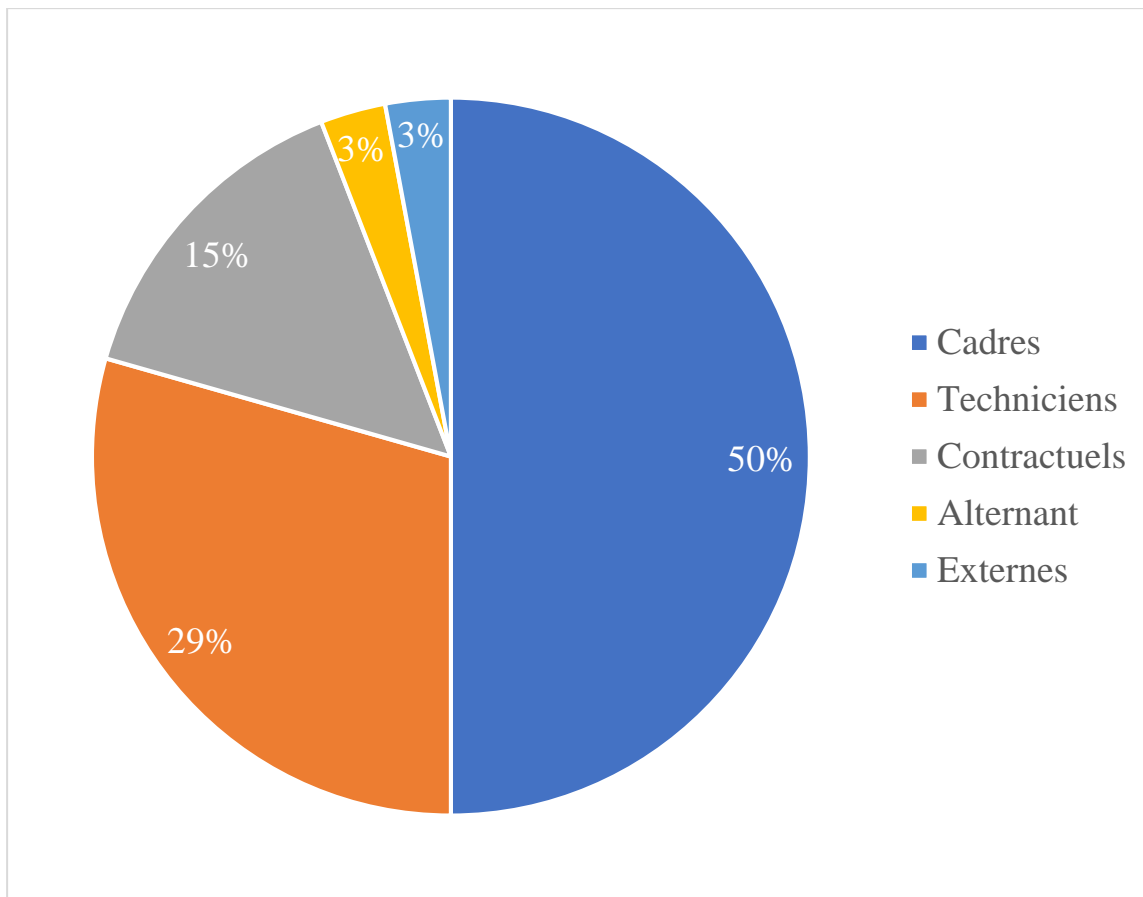


Figure 32. Répartition des opérateurs interrogés selon leur statut au sein du terrain d'étude

3.2. Déroulement et guide des entretiens

Les entretiens qui ont été réalisés sont semi-directifs (Blanchet & Gotman, 1992). Le guide d'entretien utilisé visait à obtenir des renseignements sur les points forts et faibles du terrain d'étude en s'intéressant à la vie quotidienne au laboratoire, au poste de travail de l'opérateur interrogé et sur l'opérateur lui-même (Cf. Tableau 9). Les questions étaient posées les unes à la suite des autres et nous « rebondissions » sur les thèmes évoqués par le participant. Pour certaines questions, il leur était proposé de noter la qualité d'un aspect du terrain sur une échelle de Likert en 5 points (5 = très satisfaisante, 4 = satisfaisante, 3 = ni satisfaisante ni pas satisfaisante, 2 = pas satisfaisante et 1 = pas de tout satisfaisante).

Tableau 9. Guide d'entretien utilisé sur le terrain

Thèmes	Questions
	Qu'est-ce qui fonctionne bien au sein du laboratoire selon vous ?
	Qu'est-ce qui fonctionne moins bien selon vous ?

	Que pensez-vous de la gestion de la sécurité au laboratoire ? Codage sur une échelle de Likert Pourquoi ?
Sur la vie au laboratoire en général	Que pensez-vous des locaux du laboratoire ? Codage sur échelle de Likert Pourquoi ?
	Que pensez-vous de l'ambiance entre collègues ? Codage sur une échelle de Likert Pourquoi ?
	Que pensez-vous de l'ambiance avec la hiérarchie ? Codage sur une échelle de Likert Pourquoi ?
	Pouvez-vous décrire une journée type (succession de tâches) ? Quelles sont les tâches que vous aimez le plus réaliser ? Quelles sont les tâches que vous aimez le moins réaliser ?
Précisément sur votre travail	Comment ces tâches se répartissent dans votre journée ?
	Quels effets positifs votre travail a sur vous et votre quotidien ?
	Quels effets négatifs votre travail a sur vous et votre quotidien ?
	Dans quel laboratoire travaillez-vous le plus au quotidien ?
	Quels dangers sont les plus présents à votre laboratoire selon vous ?
Sur vous	Depuis quand travaillez-vous au sein du laboratoire ?
	Quel est votre statut (cadre, technicien, doctorant, etc.) ?

Les entretiens se sont déroulés dans un bureau fermé et ont duré en moyenne 30 minutes (min = 25 min ; max = 1h30). De par le caractère confidentiel des travaux effectués sur le terrain d'étude, les entretiens n'ont pas pu être enregistrés. Nous notions les réponses sur l'ordinateur suite à chaque question en maintenant le plus possible le dialogue avec l'opérateur. Certains verbatims des personnes interviewées ont été retranscrits fidèlement. Il s'agit donc in fine d'une retranscription manuscrite partielle pour chaque entretien.

3.3. Procédure d'analyse des données recueillies

Une analyse thématique transversale des entretiens (Blanchet & Gotman, 1992) (N=34) a été effectuée afin de classer les éléments du corpus obtenu. Tous les thèmes évoqués et leurs

occurrences ont été listés par question pour chaque participant. Ensuite, une synthèse par question à travers toutes les réponses des participants a été réalisée. Les thèmes ainsi identifiés ont été comparés selon leur fréquence d'apparition (simplifiée en pourcentage d'évocation du terme sur la totalité des verbatims évoqués dans la réponse à une question) afin de répondre aux questions de recherche.

Plusieurs questions permettaient de noter la qualité d'un aspect du terrain sur une échelle de type Likert en 5 points. Ces données ont été traitées de façon descriptive. De même, les opérateurs ont décrit précisément les tâches qu'ils réalisent dans leur travail quotidien ainsi que leur durée. Grâce à cela, un pourcentage du temps alloué à la tâche dans la journée a pu être calculé.

3.4. Présentation de l'analyse de contenu des entretiens

Cette partie débute par le recensement des forces et des faiblesses du laboratoire de chimie en R&D étudié. Elle se poursuit ensuite par l'étude des perceptions qu'ont les opérateurs en termes de sécurité. Les résultats sur la perception de la qualité des locaux et des relations sont détaillés. La partie se termine sur l'organisation du travail de chimiste R&D et les tâches qui sont appréciées et non appréciées par les opérateurs.

3.4.1. Identification des forces et des faiblesses du terrain d'étude perçues par les opérateurs

Les forces et les faiblesses du terrain d'étude perçues par les opérateurs sont nombreuses (Cf. Tableau 10). Les réponses aux questions « Selon vous, quelles sont les forces de votre structure ? » et « Selon vous, quelles sont les faiblesses de votre structure ? » ont permis de construire ce tableau. Chaque réponse était divisée en thèmes abordés par l'opérateur (élément identifié dans le tableau). Les occurrences de ce thème chez tous les opérateurs étaient notées, afin d'identifier les thèmes les plus récurrents chez la population interrogée. Pour chaque thème, nous avons noté les explications des opérateurs afin de les synthétiser.

Tableau 10. Forces et faiblesses évoquées par les opérateurs, leurs nombres d’occurrences, leur explication et des verbatims

Force ou faiblesse	Nombre d’occurrences	Élément identifié	Explication	Verbatims associés
FORCES	51	Communication entre collègues	La majorité des opérateurs considèrent que l’ambiance générale, et particulièrement l’ambiance entre collègues, participe grandement à leur qualité de vie au travail. Ils évoquent notamment la bienveillance et l’entraide des collègues.	« C’est facile de communiquer avec tout le monde » « Les échanges sont riches »
	17	Management / RH	La majorité des opérateurs expriment avoir une excellente relation avec leur hiérarchie et pouvoir se confier sur tout à leur manager direct.	« Tout se passe bien, je leur dis tout même quand ça me saoule, j’ai pas de filtre »
	14	Horaires de travail	Ils organisent leur temps de la manière qu’ils souhaitent. Ils peuvent également, quelques jours par semaine, être en télétravail.	« Les horaires de travail flexibles : c’est une source de stress en moins »
	12	Locaux / équipement	Les opérateurs apprécient la qualité des équipements et des locaux.	
	3	Avantages financiers	Les opérateurs sont unanimement très satisfaits de leur salaire. Ils apprécient également les avantages annexes : tickets restaurants, activités proposées par le Comité d’Entreprise.	« On n’a pas peur du lendemain, c’est super agréable »
	3	CSE	Le CSE et leur implication dans la vie des opérateurs est ponctuellement citée comme une véritable force du terrain d’étude.	
	3	Gestion de la sécurité	Certains opérateurs considèrent que le niveau de sécurité est particulièrement élevé et strict comparativement à d’autres laboratoires.	

1	Relation clients	Certains opérateurs apprécient la qualité des échanges avec les clients	
21	Gestion de la sécurité	De nombreux opérateurs parlent d'une communication brisée entre les opérateurs et l'équipe HSE. Certains évoquent des dissimulations d'information sur les causes d'accidents alors qu'ils sont « assommés » d'injonctions de sécurité sur des points qu'ils estiment futiles. Ils notent qu'un consensus entre l'équipe HSE et les opérateurs devraient être fait sur les protocoles de sécurité.	« C'est vu comme une contrainte (la sécurité), et la communication est soit maladroite soit absente »
18	Management / HR	Ils soulignent que les managers sont trop sollicités et que les responsabilités ne sont pas assez partagées. Certains évoquent un ruissellement de responsabilités important. Également, les techniciens et les opérateurs externes considèrent qu'ils ont trop de responsabilités	« Ce n'est pas notre cœur de métier »
11	Prestataires externes	Beaucoup de services sur le terrain sont externalisés (traitement des déchets, accueil, nettoyage des locaux, entretien du bâtiment, etc.), ce qui gêne certains chercheurs. Notamment, ils considèrent que le traitement des déchets n'est pas toujours bien réalisé ce qui peut être dangereux (Cf. Partie ?).	
8	Locaux	Selon eux, ils sont mal entretenus et l'organisation de l'espace n'est pas optimale. Également, ils indiquent que le nombre d'activités au sein du bâtiment augmente et qu'ils sont de plus en plus serrés au sein des laboratoires car il n'y a pas de travaux d'agrandissement de planifié.	
5	Administratif	Les tâches administratives sont vécues comme inutiles et trop nombreuses.	

FAIBLESSES

4	Communication entre équipes	Les opérateurs notent un manque de communication entre les différentes équipes du site ce qui peut amener à des incompréhensions et même à des tensions.
2	Charge mentale	Les opérateurs évoquent une charge mentale élevée due à la multitude de tâches à effectuer.
2	Stress	Ils ressentent également du stress de ne pas pouvoir tout faire (trop de tâches et trop peu de temps pour les réaliser).
2	Équipements	Les équipements, bien que très performants sont considérés mal entretenus par les opérateurs qui regrettent un processus de maintenance trop long les bloquant dans leur manipulation expérimentale.

La prochaine partie se focalise plus particulièrement sur les perceptions des opérateurs vis-à-vis de la sécurité et de sa gestion.

3.4.2. Perceptions des opérateurs sur les caractéristiques de leur travail

Les opérateurs étaient amenés à s'exprimer sur différents thèmes via une échelle de Likert de 1 à 5 à combien ils percevaient une certaine caractéristique de leur travail comme satisfaisante ou non. Ensuite, ils étaient amenés à s'exprimer sur les raisons de leur réponse. Les résultats de ces réponses sont présentés sous forme de tableau (Cf. Tableau 11). Les réponses ont été traitées de la même manière que celles présentées précédemment.

Tableau 11. Perception des opérateurs sur les caractéristiques de leur travail

Dimension	Moyenne	Écart-type	Commentaires
La sécurité et sa gestion	3.32	0.98	<p>Problème de priorisation des informations ayant trait à la sécurité à divulguer</p> <p>Communication difficile avec l'équipe HSE (rejet des demandes, temps trop long avant traitement, pas de débat possible)</p> <p>Protocoles de sécurité trop lourds qui provoquent des retards dans les projets</p> <p>Manque de formation sur les dangers en BAG</p> <p>Trop d'accidents récents qui font craindre une future victime</p> <p>Équipe dans l'action réparatrice plutôt que dans la prévention</p> <p>Sonnettes d'alarmes non saisies par l'équipe HSE</p>
Locaux	3.36	0.78	<p>Manque de place (problème de fin de vie expérimentale)</p> <p>Locaux mal construits (alternance laboratoires et espaces communs non conformes)</p> <p>Mauvaise gestion de l'air ambiant (chaleur intense en été et froideur gênante en hiver)</p> <p>Travaux de maintenance constants (blocages réguliers des manipulations sans avertissement préalable)</p> <p>Open-spaces trop bruyants</p>
Relations avec les collègues	4.57	0.79	<p>Les opérateurs notent une ambiance chaleureuse et inclusive. Selon eux, le collectif de travail est fort. Certains notent que cela pourrait être dû au jeune âge des opérateurs et à un CE très présent.</p>
Relation avec hiérarchie	3.96	1	<p>La majorité des opérateurs déclarent une communication aisée avec les supérieurs.</p> <p>Cependant, certains opérateurs notent que certains managers sont difficiles d'accès dû à leur surcharge de travail. Il est de trouver des moments d'écoute pour les opérateurs. De plus, ceux-ci prennent parfois trop de temps pour prendre des décisions (notamment quand problème de sécurité ou conflit) ce qui frustrant certains opérateurs.</p>

La sécurité est un pan important du travail de chimiste en R&D, ceux-ci sont exposés aux risques quotidiennement. C'est à eux-mêmes, guidés par l'équipe HSE qu'il revient de prendre soin d'eux et de leur travail pour ne pas s'exposer à des risques inutiles. La bonne qualité de relation entre les opérateurs et l'équipe HSE est donc essentielle. L'établissement et le maintien de cette bonne qualité de relation doit être la priorité absolue des managers. De cette qualité dépend la qualité de la recherche et le taux d'exposition aux risques. L'équipe HSE doit donc être ouverte aux opérateurs, proactive sur la prévention (formation, sensibilisations adaptées aux postes et aux opérateurs) et avec assez de membres pour pouvoir traiter rapidement les demandes de chacun. Ceci garantit la compétitivité du laboratoire.

Des locaux fiables et sécurisés sont essentiels pour que les chimistes en R&D puissent exercer leur activité dans de bonnes conditions. Ceux-ci doivent être compartimentés avec des espaces réservés aux laboratoires et des espaces réservés au travail sur ordinateur bien clôturés. Les locaux doivent être bien entretenus, de préférence par des techniciens qui connaissent les problématiques liées au travail de la chimie. Le Facility Manager doit avoir une communication efficace sur les travaux à venir et sur les possibilités de les prévenir (prévention). Également, la qualité principale qu'il est attendu de locaux abritant de la recherche en chimie R&D est l'adaptabilité. En effet, l'activité est changeante et donc les locaux doivent pouvoir soutenir ces changements. Il est conseillé d'appréhender ces changements en amont (sur plusieurs années) afin de s'adapter plus facilement aux besoins quotidiens.

Les relations saines au travail entre collègues permettent de maintenir le bien-être des opérateurs et de leur donner des possibilités d'amélioration de leur travail. En effet, les échanges, même informels, leur permettent souvent d'avoir de nouvelles idées scientifiques, de dissiper des incompréhensions, d'obtenir des informations utiles pour leur projet, etc. Il semble donc essentiel de favoriser les dialogues et les « *discussions de couloir* » (verbatim d'un opérateur).

Également, les bonnes relations avec la hiérarchie semblent essentielles. En effet, elles permettent de donner des marges de manœuvre suffisantes pour avancer dans le projet. Elles permettent aux opérateurs de confier leurs craintes et leurs envies. Elles sont également un garant de la bonne sécurité des opérations car en cas de doute sur un point de sécurité, les managers restent les interlocuteurs premiers pour les opérateurs. Un manque de proximité / de disponibilité peut donc mener à des expositions aux risques. Il convient donc de laisser la priorité aux opérateurs dans les tâches des managers. Les managers doivent rester disponibles et ouverts aux échanges. Ils doivent aussi prendre des décisions claires rapidement afin d'assister et de protéger l'opérateur en demande.

La prochaine partie traite de l'organisation du travail des opérateurs et de leurs préférences en termes de tâches à effectuer dans le cadre de leur activité.

3.4.3. Organisation du travail et types de tâches effectuées

Nous avons demandé aux opérateurs de séquencer leurs tâches en pourcentage de temps passé pendant une journée. Nous avons fait la moyenne de ces pourcentages afin de traiter les données de façon globale. Ils étaient invités par la suite à s'exprimer sur leurs appréciations vis-à-vis de ces tâches. Ils déclarent passer 55% de leur temps de travail sur des tâches qu'ils apprécient particulièrement : la **manipulation expérimentale** est la tâche la plus appréciée par les opérateurs (50% des évocations chez les doctorants et les techniciens et 36% chez les cadres), la **gestion de projet** et les **échanges** entre chercheurs sont les deuxièmes tâches les plus appréciées. Elles concernent 13% des tâches évoquées par les doctorants, 30% par les techniciens et 50% par les cadres. Enfin, le **traitement** et la **présentation** des résultats sont les troisièmes tâches les plus appréciées par les opérateurs, avec 12% d'évocations chez les doctorants, 10% chez les techniciens et 7% chez les cadres.

Cependant, en moyenne, les opérateurs passent 28% de leur temps de travail sur des tâches qu'ils n'apprécient pas. Parmi ces tâches, le travail **administratif** et la **gestion HSE** sont les moins appréciées (40% d'évocations chez les doctorants, 46% chez les techniciens et 36% chez les cadres). Elles sont perçues comme trop chronophages et stressantes. Ensuite, le **nettoyage** et la **préparation** de manipulation (calibrage des machines, formulation, etc.) sont les deuxièmes tâches les moins appréciées (40% d'évocations chez les doctorants, 27% chez les techniciens et 7% chez les cadres). Également, le **traitement** et le **rangement des données** sont les troisièmes tâches les moins appréciées (18% d'évocations chez les techniciens).

Les opérateurs donnent du sens aux tâches techniques, directement liées au cœur du métier de la chimie. Ils accordent également de l'importance aux moments de partage avec leurs pairs, qui sont directement liés selon eux, au travail scientifique. En revanche, ils peinent à trouver du sens dans les tâches administratives, ainsi que dans les tâches de préparation et de nettoyage, qui pourraient être, selon eux, confiées à d'autres opérateurs ou facilitées.

Cette répartition des tâches et le type d'activités réalisées ont un impact sur les opérateurs. La partie suivante identifie les différents impacts en fonction de leur valence.

3.4.4. Quels sont les effets du travail sur leur bien-être selon les opérateurs ?

Le travail dans un laboratoire du futur en chimie a de nombreux effets positifs et négatifs. Nous identifierons les effets cités par les opérateurs selon leur valence (Cf. Tableau 12).

Tableau 12. Liste des effets rapportés du travail sur les opérateurs chimistes

Effets cités par opérateurs	Nombre d'occurrences	Valence
Sécurité financière	16	Positive
Socialisation	14	Positive
Fierté	10	Positive
Valorisation sociale	8	Positive
Épanouissement	7	Positive
Progression professionnelle	6	Positive
« Aime venir au travail »	4	Positive
Sentiment d'utilité	4	Positive
Autonomie	3	Positive
Diminution santé mentale	16	Négative
Charge mentale élevée	12	Négative
Fatigue physique et visuelle	11	Négative
Frustration	9	Négative
Manque de coupure vie professionnelle/personnelle	8	Négative
Manque de compréhension externe	8	Négative
Sentiment d'abandon	7	Négative
Insécurité	4	Négative
Douleurs / inconfort	3	Négative
Problèmes de santé	3	Négative
Trop de temps de trajet	1	Négative
Isolement	1	Négative

Pour les effets positifs, qui maintiennent la mobilisation et la santé au travail, nous avons identifié quatre effets cités de nombreuses fois : la **sécurité financière** (paie et avantages), la **socialisation** (collègues qui deviennent des amis), la **fierté** due à un métier socialement valorisé et l'**épanouissement intellectuel**. Des facteurs plutôt favorables au bien-être mental au travail (Desrumaux, 2010).

Nous avons identifié quatre effets négatifs particulièrement cités par les opérateurs : une **santé mentale** diminuée (stress, épuisement mental, etc.), une **charge mentale** croissante, une **fatigue** physique et visuelle, ainsi que de la **frustration** due au partage des équipements avec les autres collègues.

L'activité de chimiste en R&D a de nombreux effets positifs. La plupart des opérateurs interrogés sont très satisfaits de leur travail. Ils souhaitent continuer leur activité le plus longtemps possible. Cependant, certaines caractéristiques amènent des effets négatifs. Ces caractéristiques ont été présentées tout au long de ce chapitre. Il convient aux organisateurs du travail de les prendre en compte afin d'améliorer le bien-être des opérateurs chimistes. Pour cela, les résultats de l'intervention des psychologues du travail et des ergonomes ont été présentés lors d'une réunion avec le comité de pilotage.

3.5. Variabilités identifiées dans l'activité de chimiste

Les variabilités ont des impacts sur l'activité et sur l'exposition aux risques des opérateurs. Il convient donc de les identifier. Cette identification a été réalisée également pour répondre aux objectifs du projet PACBOT afin de choisir des scénarios de conception des cobots et de tests de ces solutions. Pour classer les variabilités nous avons utilisé la classification qui a été créée (Cf. Section 3, Chapitre 2) lors de la revue de littérature sur les variabilités au travail (Cf. Tableau 13).

Tableau 13. Catégorisation des variabilités identifiées sur le terrain d'étude

Type de variabilités		Variabilité identifiée
Variabilités techniques	<i>Normales</i>	Milieu Type de laboratoire Distance entre laboratoires
		Matériel Dangerosité, collabilité des produits Agents CMR
		Outils Type de process à créer Usure
	<i>Incidentelles</i>	Milieu Niveau d'encombrement
		Matériel État et viscosité du mélange Dysfonctionnement
Variabilités organisationnelles	<i>Normales</i>	Outils Type de projet de recherche
		Collectif Règles de travail Protocole sécurité
	<i>Incidentelles</i>	Collectif Présence responsable HSE

Transfert de tâches entre opérateurs

		Procédures	
Variabilités inter-individuelles	<i>Court-terme</i>	Physiques	Etat physique
		Cognitives	Expérience sur la tâche
		Psychosociales	Confiance en soi au travail
	<i>Long-terme</i>	Physiques	Taille, genre, main dominante
		Cognitives	Formation universitaire
		Psychosociales	Expérience dans l'entreprise
Variabilités intra-individuelles	<i>Court-terme</i>	Physiques	Fatigue physique
		Cognitives	Charge mentale
		Psychosociales	Stress
	<i>Long-terme</i>	Physiques	Vieillessement
		Cognitives	Vieillessement
		Psychosociales	Stress dû aux sollicitations

Ces différentes variabilités peuvent avoir des effets positifs (c'est-à-dire aider l'opérateur à effectuer sa tâche, par exemple, une variabilité de produit utilisé peut l'amener à être toujours attentif aux changements et donc à être davantage prêt à éviter les risques), négatifs (c'est-à-dire pousser l'opérateur à réguler son activité en diminuant sa santé, sa performance, par exemple, une variabilité de taille peut amener un équipement à être peu adapté à la taille de certains opérateurs ce qui les contraint à adopter des postures inconfortables) ou neutres en fonction de la situation. Une même variabilité peut avoir un effet négatif sur un opérateur et un effet positif sur un autre opérateur. Il y a de la variabilité individuelle dans les impacts qu'ont les variabilités du travail. Par exemple, une grande distance entre deux laboratoires dans lesquels l'opérateur doit effectuer sa manipulation expérimentale peut avoir des effets imposés. En effet, des opérateurs sont ravis de pouvoir se dégourdir les jambes alors que d'autres y voient une perte de temps précieux. De même, une haute confiance en soi au travail peut amener à prendre des risques en se surestimant mais elle peut aussi amener à maîtriser son stress lors de la manipulation de produit CMR.

Il est donc difficile de classer les variabilités selon la valence de leurs effets, tant ceux-ci sont dépendants du contexte et de l'opérateur concerné. En revanche, nos observations nous ont permis d'établir une liste de variabilités toujours liées à des effets négatifs sur l'opérateur et sur sa tâche sans présence notable d'effets positifs :

- La dangerosité des produits
- Le niveau d'encombrement
- Les dysfonctionnements des outils / machines
- La fatigue physique

- La charge mentale
- Le stress (notamment de manipuler des produits toxiques)

Ces variabilités ne sont pas toujours gérées par l'organisation du travail. Leur impact pourrait potentiellement être amoindri si un cobot était programmé pour les prendre en compte en assistant l'humain. Un cobot pourrait aider à la prise en charge de ces variabilités. Et cette aide pourrait renforcer son acceptation située selon le modèle de Bobillier Chaumon (2016). En effet, il permettrait une bonne évaluation de la dimension individuelle, en évitant une surcharge de l'opérateur, de la dimension organisationnelle, en permettant une meilleure régulation de l'activité et de la dimension professionnelle, en maintenant un sens au travail par le maintien de certaines activités importantes pour l'opérateur.

Pour compléter l'analyse de l'activité effectuée, des entretiens ont été menés sur le terrain afin d'approfondir notre compréhension de l'activité et d'obtenir des données sur les perceptions des différents opérateurs. Ces entretiens sont présentés dans la partie suivante.

3.6. Restitution de l'analyse et des entretiens au comité de pilotage

Le comité de pilotage s'est réuni à la suite de l'intervention afin de discuter des résultats obtenus. L'équipe de psychologue du travail et d'ergonome a présenté le projet, leur méthode et les résultats (Cf. Annexe 4). Suite à cela, ils ont proposé des recommandations concernant l'implémentation cobotique. Le comité a pris acte des résultats pour l'implémentation cobotique. Il a été convenu que pour poursuivre la conception de la future interaction humain / cobot, davantage d'analyses sur le terrain (exemple : des simulations) couplées à des avancées robotiques devront être effectuées avant une réelle implémentation sur le poste de travail repéré. Le comité a également échangé autour des résultats de l'analyse des forces et faiblesses afin de faire émerger de potentielles améliorations. Il a été convenu que les intervenants présenteraient ces résultats et les recommandations d'optimisation dans tout le personnel du site par souci de transparence.

3.7. Synthèse du chapitre

L'analyse de la demande sur le terrain a permis d'identifier deux demandes différentes. La première, liée à l'implantation cobotique, concerne l'identification d'un poste de travail adéquat pour une implémentation cobotique ainsi que la prise en compte des besoins des opérateurs. La deuxième demande, directement issue des différents opérateurs du laboratoire de chimie R&D, concerne la réalisation d'une analyse des forces et des faiblesses du laboratoire afin d'obtenir des pistes d'amélioration pour le futur. Un comité de pilotage a été mis en place afin de veiller au bon déroulement des missions confiées. Pour répondre à ces deux demandes, une triangulation de trois méthodes a été utilisée. Une analyse de l'activité a été réalisée sur 9 postes de travail, 11 opérateurs pour un total de 18 heures d'observation. Également, le DU a été analysé. Et pour finir, des entretiens ont été menés auprès de 34 opérateurs afin de recueillir leur perception sur l'organisation du travail au sein du laboratoire. A la fin de l'intervention, les forces et les faiblesses de la structure ont été listées afin de les porter à la connaissance du comité de pilotage. La classification des variabilités et des situations à risques à la santé a permis d'élaborer des scénarios de conception et de mise en tests utilisateurs.

Les résultats ont permis de mieux comprendre le travail de chimiste en R&D. Ils ont montré que le poste de travail ayant l'exposition aux risques la plus grande est la BAG. Celle-ci pourrait bénéficier d'une interaction humain / cobot pour diminuer les risques auxquels s'expose l'humain. En fait, certaines tâches des opérateurs sont invisibilisées, notamment les déplacements et le nettoyage. Cependant, ce sont des tâches où l'opérateur peut facilement s'exposer à des risques. Or, ces risques sont minimisés par les opérateurs et ignorés par les managers. En effet, les opérateurs ne peuvent pas respecter les consignes de sécurité, ce qui les expose grandement. L'intervention a permis d'appréhender l'exposition aux risques en fonction des caractéristiques de l'opérateur et de son milieu de travail. Les différentes variabilités identifiées ont été classées afin de les prendre en compte dans l'organisation du travail. Globalement, les opérateurs sont satisfaits de leur travail car celui-ci leur apporte la sécurité financière, la sociabilisation et la valorisation sociale. Cependant, nombreux sont les opérateurs qui notent une diminution de leur santé mentale due à une augmentation de la charge mentale et du stress, ainsi qu'une augmentation de leur fatigue physique et visuelle. La restitution des résultats au comité de pilotage a permis une discussion centrée-solutions. La classification des variabilités et des situations à risques à la santé a permis d'élaborer des scénarios de conception et de mise en tests utilisateurs.

ÉTUDE 2 : PREMIER TEST UTILISATEUR : TEST DES EFFETS DE L'ASSISTANCE COBOTIQUE SUR LA PERFORMANCE ET LA CHARGE MENTALE D'UNE TACHE D'ASSEMBLAGE

Chapitre 1. Présentation de l'étude et méthode utilisée

1.1. Objectifs et hypothèses

Le but de ce premier test utilisateur a été de tester si un cobot peut apporter une collaboration efficace et efficiente à tout utilisateur quel qu'il soit. La variabilité inter-individuelle est ainsi prise en compte dans cette première expérimentation. Nous avons supposé que la collaboration permet une meilleure performance : augmentation de l'efficacité, de l'efficience et de la satisfaction.

Nos hypothèses opérationnelles étaient les suivantes :

H1 : La charge de travail perçue sera plus faible pour une tâche d'assemblage dans une condition de collaboration avec le cobot que dans une condition contrôle (humain seul).

H2 : Le temps de réalisation sera plus faible pour une tâche d'assemblage dans une condition de collaboration avec le cobot que dans une condition de contrôle (humain seul).

H3 : Le nombre d'erreurs sera plus faible pour une tâche d'assemblage dans une condition de collaboration avec le cobot que dans une condition de contrôle (humain seul).

H4 : Le nombre de gestes sera plus faible pour une tâche d'assemblage dans une condition de collaboration avec le cobot que dans une condition de contrôle (humain seul).

1.2. Procédure et participants

Cette étude a été pré-enregistrée sur OSF³⁴. 54 participants (âge moyen : 21,4 ans ; ET : 3,9 ; 42 femmes et 12 hommes) ont accepté de participer à l'expérience à l'Université Grenoble-

³⁴ Open Science Framework

Alpes. Ils n'ont reçu aucune compensation financière pour leur participation. Cependant, les étudiants en psychologie pouvaient demander des crédits supplémentaires pour un ensemble de cours. Ils ne présentaient pas de déficience visuelle (daltonisme, etc.). Les participants ont reçu des explications sur l'expérience elle-même et sur la manière dont leurs données seront traitées (Cf. Annexe 5). Après cette introduction, ils ont reçu un formulaire de consentement à signer pour poursuivre l'étude (CF. Annexe 6). Ce formulaire a été utilisé pour tous les TUs.

1.3. Protocole expérimental

Nous avons mis au point un plan à deux conditions inter-sujets. Les participants ont été répartis au hasard dans un groupe. Dans la condition de contrôle, 32 participants ont effectué la tâche seuls, tandis que dans la condition expérimentale, 22 participants ont effectué la tâche en collaboration avec un cobot. Le recrutement pour la condition de contrôle a eu lieu en avril 2021, avant la condition expérimentale car le cobot n'était pas encore prêt. Le recrutement pour la condition expérimentale a eu lieu en mai 2021, pendant la restriction COVID. Les deux groupes étaient inégaux pour cette raison.

Notre objectif était de proposer un type de tâche pouvant être réalisé à la fois en collaboration avec un cobot ou seul, et permettant d'étudier la charge de travail tout en tenant compte des contraintes techniques du cobot. Nous avons choisi de simuler une tâche typique de l'environnement industriel : un assemblage de composants. Dans notre étude exploratoire, la tâche a été réalisée à l'aide de Duplos (Lego). Chaque participant devait reproduire trois modèles (Cf. Figure 33).



Figure 33. Présentation des trois modèles à répliquer par le participant.

L'ordre de présentation des modèles était aléatoire. Chaque participant disposait d'un stock de Duplos sur sa gauche (zone 1 de la figure 34). Il devait reproduire le modèle dans la "zone de construction" (zone 2 de la figure 34). Dans la condition expérimentale, le stock du cobot était placé à la droite du participant (zone 3 de la figure 34).

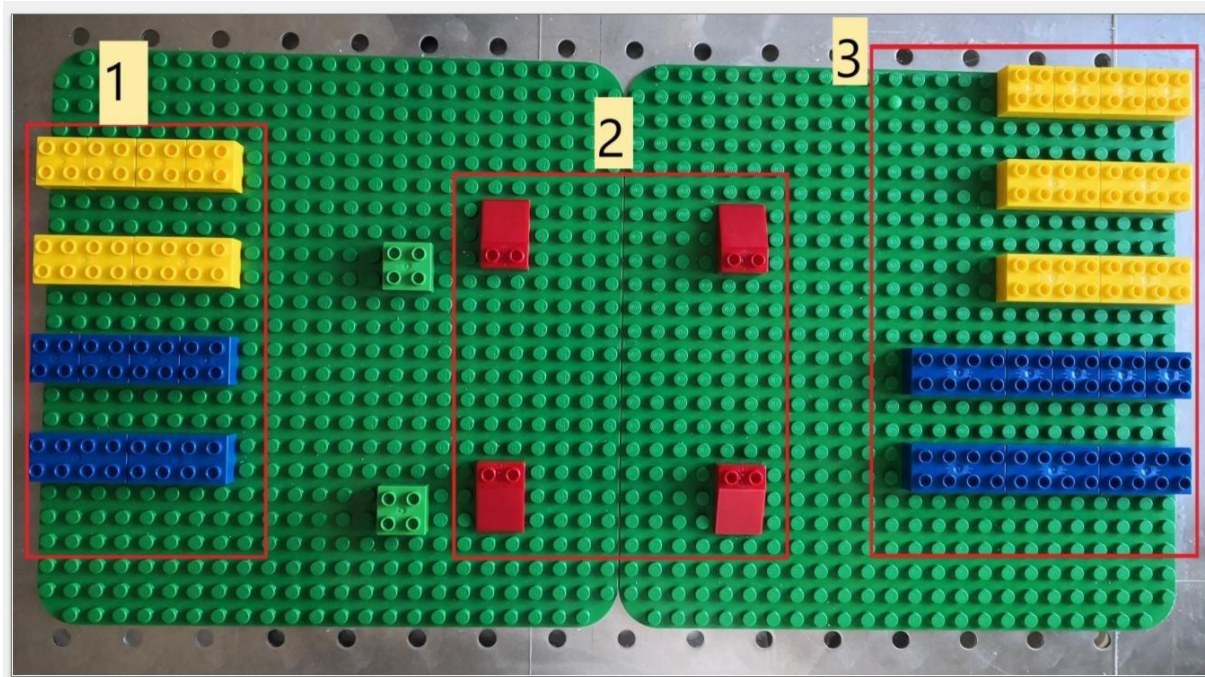


Figure 34. Localisation du stock du participant (1), de la zone de construction (2), et du stock du cobot (3).

Dans la condition expérimentale, le cobot a collaboré avec l'humain en plaçant des pièces sur la zone de construction en même temps que le participant, en indiquant si une erreur avait été commise à l'aide de l'interface de communication et en fournissant du stock supplémentaire au participant (entre les Duplos verts à gauche de la zone 2). Le cobot alternait les actions (Cf. Tableau 14) et les phases de perception (pendant lesquelles il s'arrêtait et analysait le placement des Duplos). Ses instructions étaient les mêmes que celles de l'humain : il devait compléter le modèle.

Tableau 14. Illustration de la répartition des activités entre l'humain et le cobot dans la condition de collaboration

Time (in seconds)	Participant	Cobot
0–5	Regarde le modèle	Avertit le participant de son prochain mouvement sur son écran
5–10	Regarde l'écran pour savoir où le cobot va chercher sa pièce	Initie le mouvement de prendre une pièce
10–15	Prend une pièce	Prend une pièce
15–20	Place une pièce et regarde le modèle	Initie le mouvement de placement de la pièce
20–25	Prend et place deux autres pièces	Place une pièce

25–30	Prend et place une autre pièce	Avertit le participant de sa phase de perception sur son écran
30–40	Attend et regarde l'écran	Prend une photo de la construction
40–45	Regarde le modèle et l'écran	Avertit le participant de son prochain mouvement sur son écran
45–50	Prend et place une autre pièce	Initie le mouvement de prendre une pièce afin de rattraper une erreur commise par le participant
50–55	Prend et place deux autres pièces	Prend une pièce
55–60	Regarde le modèle	Initie le mouvement pour placer la pièce dans l'espace approprié
60–65	Prend et place la dernière pièce	Place la pièce dans l'espace approprié
65–70	Examine le modèle et la construction	Avertit le participant de sa phase de perception sur son écran
70–75	Attend et regarde l'écran	Prend une photo de la construction
75–80	Attend et regarde l'écran et le modèle	Avertit le participant de la réussite de la construction
80–85	Regarde l'expérimentateur pour obtenir des instructions	Passé en mode veille

Pendant la majeure partie de l'expérience, le rythme était fixé par le participant et le cobot devait s'adapter. Cependant, en raison de contraintes techniques, les participants ne pouvaient pas agir lorsque le cobot était en phase de perception. Ils devaient attendre et reprendre la suite de ses actions une fois la phase de perception terminée. Dans la condition de collaboration, les participants ont eu une session d'entraînement de trois minutes avec une démonstration sur la façon de compléter un modèle. L'expérience s'est déroulée dans une pièce aérée et bien éclairée. Dans la condition expérimentale, les participants ont réalisé une session d'entraînement de cinq minutes sur la manière de compléter un modèle et d'interagir avec le cobot.

Aucun participant n'a manifesté de fatigue mentale ou physique importante. Des instructions spéciales leur ont été données pour qu'ils consultent l'écran du cobot afin de savoir où il allait placer sa prochaine pièce et quand il allait passer à la phase de perception.

1.4. Outils utilisés

Le cobot utilisé (Cf. Figure 35) pour cette tâche était un YuMi (abréviation de You and Me) créé par l'entreprise ABB Robotics (ASEA Brown Boveri). Il a été utilisé pour trois raisons :

- Il s'agit d'un cobot industriel déjà mis en œuvre dans de nombreuses usines industrielles ;
- C'est le robot le plus "collaboratif" existant actuellement ;
- Il est conçu avec un haut niveau de sécurité (articulations rembourrées en caoutchouc, angles incurvés, etc.).

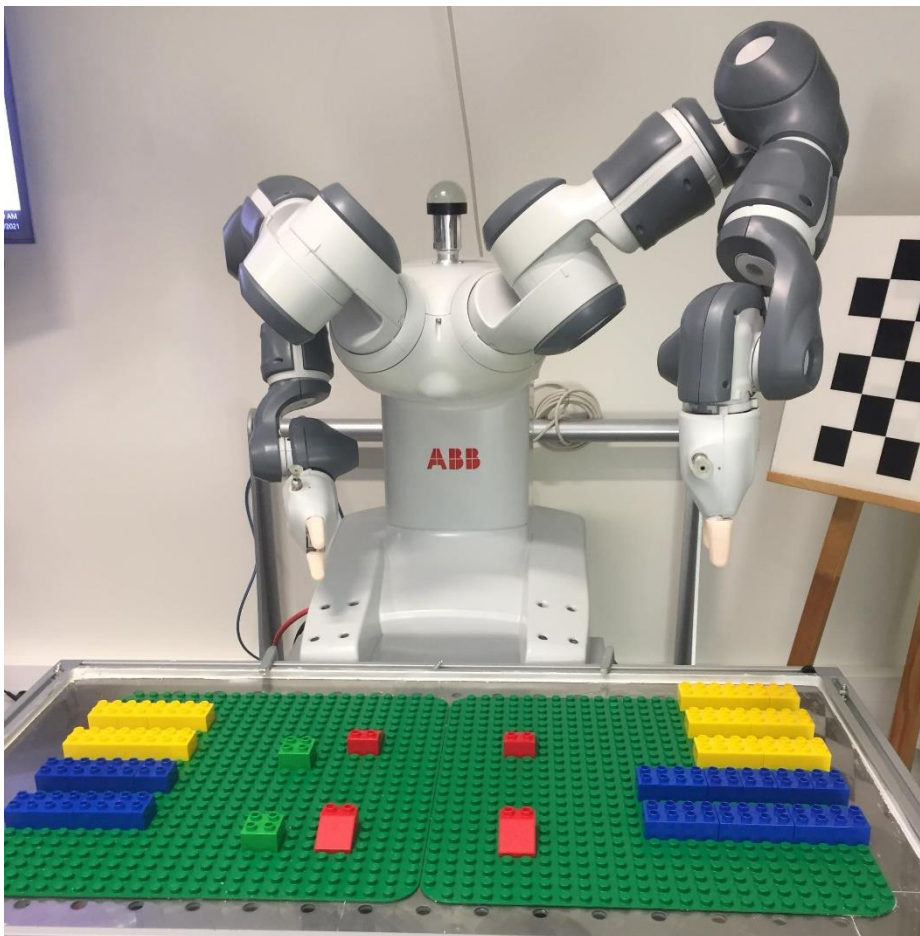


Figure 35. Le robot YuMi (ABB) utilisé dans l'expérience

Le cobot a été programmé à différents niveaux grâce à une architecture robotique modulaire. Tout d'abord, le module de vision perçoit l'environnement et la présence de la main du participant lors de la phase de perception afin d'assurer une description fidèle de l'environnement qui n'est pas occulté par la main du participant. Cette étape a été réalisée en

utilisant le langage de programmation Python et la bibliothèque de vision informatique OpenCV. Ensuite, la description de l'environnement obtenue à partir du module de perception est utilisée pour déduire la progression de la tâche collaborative effectuée par le robot et le participant. Ces informations sont utilisées pour piloter un modèle conceptuel cognitif qui, à son tour, utilise des techniques de planification automatisée pour générer un comportement intelligent adaptatif qui correspond à la variabilité de la tâche d'assemblage. Le comportement intelligent est un plan : une séquence d'actions qui compose la tâche de prise et de placement (ouverture de la pince, déplacement du bras du robot d'un endroit à l'autre, fermeture de la pince, etc.). La séquence d'actions générée pour tenir compte de la variabilité de la tâche de manière intelligente est exécutée sur YuMi à l'aide du langage d'assemblage de bas niveau fourni par ABB (le fabricant du robot). Enfin, le plan (comportement intelligent composé d'une séquence d'actions) et le mouvement du robot sont projetés sur un écran par le biais d'une interface utilisateur graphique (GUI) afin d'expliquer le comportement intelligent au participant en l'informant de ce qui va se passer ensuite.

Tous les participants ont reproduit les trois modèles tout en étant filmés. Les enregistrements vidéo ont été analysés à l'aide du logiciel The Observer (version 15.0.1200). Nous avons observé le temps de réalisation, le nombre d'erreurs (lorsqu'une pièce est placée, retirée et replacée) et le nombre de gestes, ces derniers étant définis comme des mouvements d'un membre supérieur (placement, retrait d'une pièce, gestion du stock, réflexion, vérification, attente, interaction avec le robot et gestes empêchés).

Enfin, les participants ont complété une version traduite (Cegarra & Morgado, 2009) du NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988) afin d'évaluer la charge de travail qu'ils ont ressentie (Cf. Tableau 15). Cette échelle mesure la charge de travail perçue à travers six sous-échelles : charge cognitive, charge physique, pression temporelle, frustration, effort et performance. Il se déroule en deux étapes (Hart & Staveland, 1988). Conformément au protocole d'usage de cette échelle, dans un premier temps, nous avons demandé aux participants d'évaluer chaque sous-échelle sur une échelle de 0 à 100. Ensuite, nous leur avons demandé de classer les différentes sous-échelles en fonction de l'impact de chacune d'entre elles sur leur ressenti général. Ce classement va de 1 à 6, 1 représentant la sous-échelle ayant l'impact le plus faible sur le ressenti général et 6 représentant la sous-échelle ayant l'impact le plus élevé sur le ressenti de charge mentale. Toutes ces informations nous ont permis d'obtenir le score pondéré de la charge de travail perçue par chaque participant.

Tableau 15. Version française du questionnaire NASA-TLX utilisé dans l'expérience

<i>Charge cognitive</i>	Quelle quantité d'activité mentale et perceptive a été nécessaire pour réaliser la tâche (par ex. réfléchir, décider, chercher, etc.) ? La tâche vous a-t-elle paru simple, nécessitant peu d'attention ou complexe, nécessitant beaucoup d'attention ?
<i>Charge physique</i>	Quelle quantité d'activité physique a été nécessaire pour réaliser la tâche (par ex. pousser, déplacer, tourner, manipuler etc.) ? La tâche vous a-t-elle paru facile, peu fatigante, calme ou pénible, fatigante, active ?
<i>Pression temporelle</i>	Quelle pression temporelle avez-vous ressentie durant l'exécution de la tâche ? Fallait-il gérer la réalisation de la tâche de manière lente ou de manière rapide ?
<i>Performance</i>	Comment estimez-vous votre performance en ce qui concerne la réalisation de la tâche ? Quel est votre niveau de satisfaction concernant votre performance ?
<i>Effort</i>	Quel effort (mental et physique) avez-vous dû fournir pour atteindre votre niveau de performance ?
<i>Frustration</i>	Vous êtes-vous senti satisfait, content, relaxé ou plutôt ennuyé, irrité, stressé pendant la réalisation de la tâche ?

Le questionnaire a été réalisé à l'aide du logiciel QUALTRICS version 2005. La cohérence interne du questionnaire a été confirmée : aucun item n'était corrélé à plus de 0,70 avec un autre, l'indice KMO était supérieur à 0,50 (0,659), et le test de Bartlett était significatif ($K(15) = 46,590, p < 0,01$). Les résultats de l'étude ont été calculés à l'aide de RStudio, version 1.4.1106. Les résultats présentés ci-dessous proviennent d'un ensemble de données disponible sur GitHub (Datacobot2021a), et un code open source spécifique a été appliqué (RcodeDatacobot2021a). Des tests t non appariés ont été utilisés pour tester les hypothèses de l'étude, $p < 0,05$ étant considéré comme statistiquement significatif. Les hypothèses de distribution normale et d'égalité des variances ont été testées, et le test de Wilcoxon a été utilisé le cas échéant.

Après cette expérience, de nouvelles questions de recherche ont émergé suite aux retours des chercheurs ayant expertisé notre article. En effet, le cobot se montrait avantageux par rapport à la tâche réalisée par un seul opérateur, mais le serait-il toujours en le comparant à une situation de collaboration humain / humain ? Notre tâche était jugée comme trop facile pour être comparée à une tâche industrielle, nous verrons que les scores de la NASA-TLX montrent une charge mentale relativement faible. Nous avons donc ajouté une variabilité de complexité

de la tâche dans la deuxième expérience. De plus, nous avons décidé d'évaluer les différences entre deux types de duos, les duos humain / humain et les duos humain / cobot. L'objectif de cette étude est de déterminer si la réussite de l'humain dans une tâche (Fournier et al., 2022 ; Schoose et al., 2023), le temps de réalisation (Fager et al., 2019 ; Fournier et al., 2022 ; Mariscal et al., 2023), le nombre d'erreurs (Fournier et al., 2022 ; Mariscal et al., 2023), la charge de travail (Fournier et al., 2022 ; Kildal et al., 2019), le nombre de gestes (Fournier et al., 2022) et l'acceptabilité de la collaboration sont différents selon qu'il s'agit d'une collaboration Humain/Humain (H/H) ou Humain/Cobot (H/C) en contrôlant certaines variabilités. Par exemple, une collaboration cobotique est plus efficace que son absence lors de la réalisation d'une tâche facile (Fournier et al., 2022), mais elle doit encore se montrer suffisamment flexible pour être efficace lors de la réalisation d'une tâche complexe, plus proche d'une situation de travail réelle (Kildal et al., 2018). Cette variabilité de la complexité des tâches doit être étudiée. Par ailleurs, pour guider la conception du cobot, il était nécessaire de déterminer si l'utilisation du bras du cobot pouvait avoir un impact différent selon qu'il était en accord avec la main dominante du participant (par exemple en utilisant le bras droit face au participant lorsqu'il est droitier) ou non (par exemple en utilisant le bras droit face au participant lorsqu'il est gaucher). Pour ces raisons, dans notre recherche, nous avons cherché à déterminer comment le cobot s'adapte à ces deux variabilités (demande de tâche et main dominante) au cours d'une tâche d'assemblage. Nous avons souhaité également mesurer l'impact de la collaboration H/C sur la charge de travail humaine, qui est la quantité de ressources mentales utilisées pour une tâche spécifique (Verhulst, 2018), et le nombre de gestes (Catchpole et al., 2019). Cette nouvelle expérience est expliquée dans la partie suivante.

Chapitre 2. Résultats du premier TU : test des effets de l'assistance cobotique sur la performance et la charge mentale d'une tâche d'assemblage

2.1. Effet de la collaboration sur la charge de travail perçue (H1)

Dans la condition contrôle (Cf. Figure 36), les participants rapportent une charge de travail moyenne de 37.5 sur 100 ($ET = 12.9$, $min = 15.2$, $max = 59.1$, $N = 32$) et de 35,5 dans la condition expérimentale ($ET = 15.3$, $min = 11.3$, $max = 62.5$, $N = 22$).

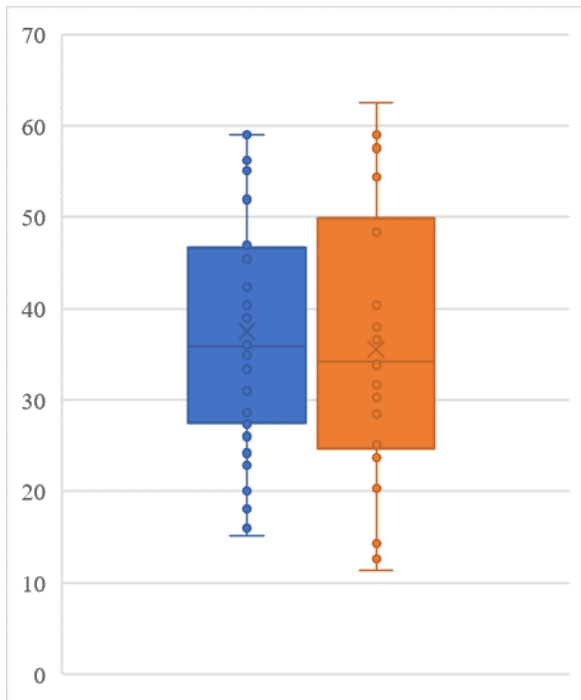


Figure 36. Diagramme en boîte des valeurs de charge de travail en condition contrôle (bleu) et en condition expérimentale (orange)

Il n'y a pas d'effet significatif de la collaboration sur l'auto-évaluation (NASA-TLX) de la charge de travail ($t(52) = 0.51, p = 0.61$).

2.2. Effet de la collaboration sur le temps de réalisation (H2)

Les participants ont mis en moyenne 54.8 secondes ($ET = 18.5, min = 19.4, max = 146.4, N = 32$) à reproduire le modèle dans la condition contrôle et 136.4 secondes en moyenne ($ET = 30.9, min = 80.9, max = 213.7, N = 22$) dans la condition expérimentale (Cf. Figure 37).

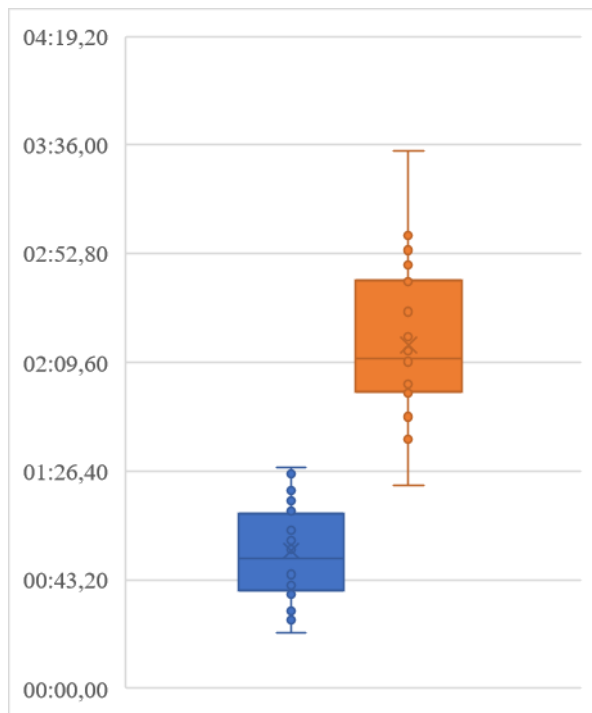


Figure 37. Diagramme en boîte du temps de réalisation en condition contrôle (bleu) et en condition expérimentale (orange)

Il y a un effet significatif de la collaboration sur le temps de réalisation ($t(52) = -12.76$, $p = 2.2 \cdot 10^{-12}$). Travailler avec un robot entraîne un temps de réalisation de la tâche plus long. Cependant, les réponses au questionnaire NASA-TLX indiquent que les participants perçoivent moins de pression temporelle dans la condition de collaboration ($t(43.5) = 4.6$, $p = 3.67 \cdot 10^{-5}$).

2.3. Effet de la collaboration sur le nombre d'erreurs (H3)

Les participants ont fait en moyenne huit erreurs pendant la réalisation de la tâche (Cf. Figure 38) dans la condition contrôle ($ET = 5.8$, $min = 0$, $max = 20$, $N = 32$) et deux dans la condition collaboration ($ET = 1.8$, $min = 0$, $max = 6$, $N = 22$).

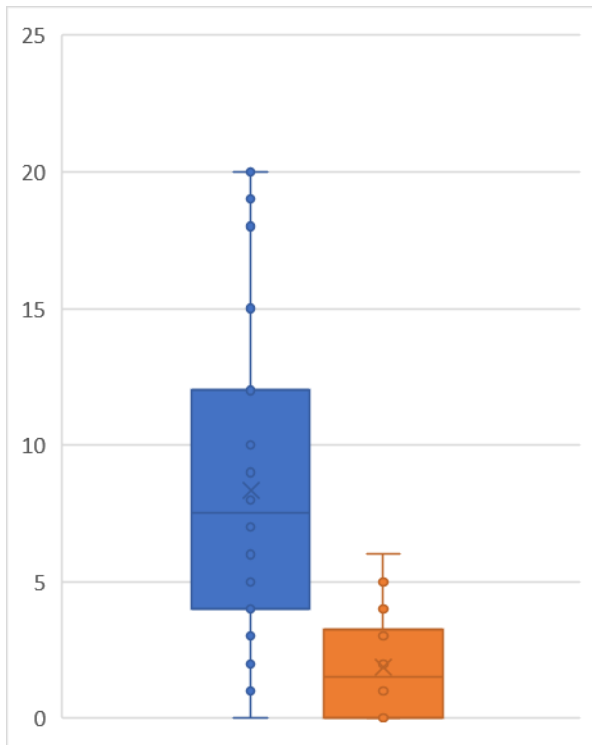


Figure 38. Diagramme en boîte du nombre d’erreurs en condition contrôle (bleu) et en condition expérimentale (orange)

Il y a un effet significatif de la collaboration sur le nombre d’erreurs ($w = 618.5$, $p = 2.56 \cdot 10^{-6}$). Travailler avec le cobot a permis de faire moins d’erreurs.

2.4. Effet de la collaboration sur le nombre de gestes (H4)

Les participants ont fait 74 gestes en moyenne ($ET = 20$, $min = 41$, $max = 124$, $N = 32$) dans la condition contrôle et 51 ($ET = 9.8$, $min = 34$, $max = 72$, $N = 22$) dans la condition expérimentale (Cf. Figure 39).

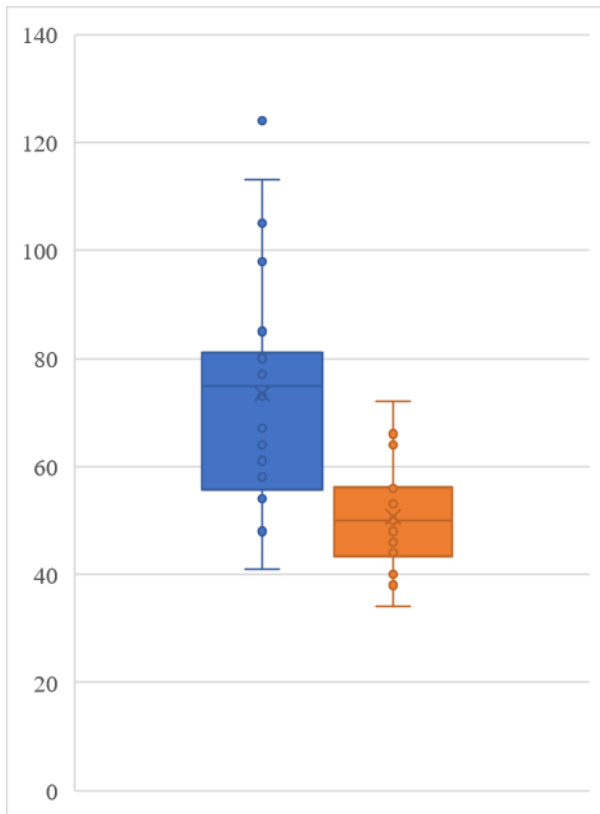


Figure 39. Diagramme en boîte du nombre de gestes en condition contrôle (bleu) et en condition expérimentale (orange)

Il y a un effet significatif de la collaboration sur le nombre de gestes effectué ($t(52) = 4.95$, $p = 8.07 \cdot 10^{-6}$). Les participants réalisent moins de gestes lorsqu'ils travaillent avec un cobot.

3. Synthèse du premier TU

Contexte : L'industrie 4.0 met en œuvre des technologies intelligentes afin d'accroître la productivité et de diminuer les risques associés au travail. L'utilisation de cobots est considérée par l'industrie comme un moyen potentiel de réduire les contraintes physiques et d'améliorer les performances sans avoir à remplacer le facteur humain. La recherche n'a pas encore prouvé ces avantages pour les humains. L'objectif de cette étude était de déterminer si le fait de travailler avec un cobot améliorerait la charge de travail perçue par un opérateur et la facilité d'utilisation du système.

Méthode : Les participants ont reproduit trois modèles de construction en utilisant des Duplos. Environ la moitié de nos participants (N = 32) ont accompli la tâche seuls et l'autre moitié a accompli la même tâche avec un cobot (N = 32). Nous avons ensuite utilisé le NASA-TLX pour mesurer la charge de travail et, par le biais d'une sous-dimension, la charge cognitive perçue. Le temps de réalisation (pour chaque modèle), le nombre d'erreurs (placement et remplacement d'une pièce) et le nombre de gestes (mouvements des membres supérieurs) ont également été mesurés.

Résultats : La collaboration avec un cobot a entraîné significativement moins de gestes (51 vs. 74), moins d'erreurs (2 vs. 8), et une réduction de la demande de temps perçue mais une augmentation du temps de réalisation (136 vs. 55 s). La charge cognitive perçue n'a pas été affectée par le cobot (36 vs. 37).

ÉTUDE 3 : DEUXIÈME TEST UTILISATEUR : TESTS DE LA PRISE EN COMPTE DANS L'ASSISTANCE COBOTIQUE DE LA COMPLEXITE DE LA TACHE ET DE LA MAIN DOMINANTE

Chapitre 1. Présentation de l'étude et méthode utilisée

1.1. Objectifs et hypothèses

Le deuxième test utilisateur devait nous permettre de déterminer l'impact de la collaboration de travail entre l'humain et le cobot sur la performance humaine, la charge de travail, les gestes et l'acceptabilité dans une situation de travail, avec une programmation cobotique visant à prendre en compte deux variabilités différentes généralement trouvées dans les situations de travail : une variabilité organisationnelle (complexité de la tâche) et une variabilité inter-personnelle (type de main dominante). Nous allons également identifier les effets de la gestion de ces variabilités sur la variabilité intra-individuelle de la charge de travail. Pour renforcer les qualités expérimentales, nous avons choisi une condition contrôle impliquant la collaboration avec un humain, contrairement à la condition contrôle du premier test.

Nos hypothèses opérationnelles étaient les suivantes :

H1 : L'effet de la complexité de la tâche sur la charge de travail (H1a), le succès de la tâche (H1b), le nombre d'erreurs (H1c), le temps de réalisation (H1d) et le nombre de gestes (H1e) des participants est plus faible en condition de collaboration avec un cobot qu'en condition de collaboration avec un humain (effet d'interaction).

H1a : Le score de **charge de travail** ne sera pas augmenté par le niveau de **difficulté de la tâche** dans la condition H-C contrairement à la condition H-H.

H1b : Le **succès de la tâche** sera plus fréquent quelques soit le niveau de **difficulté de la tâche** dans la condition H-C contrairement à la condition H-H.

H1c : Le **nombre d'erreurs** ne sera pas augmenté par le niveau de **difficulté de la tâche** dans la condition HC contrairement à la condition H-H.

H1d : Le **temps de réalisation** ne sera pas augmenté par le niveau de **difficulté de la tâche** dans la condition H-C contrairement à la condition H-H.

H1e : Le **nombre de gestes** ne sera pas augmenté par le niveau de difficulté de la tâche dans la condition H-C contrairement à la condition H-H.

H2 : L'adaptation du cobot à la main dominante de l'opérateur a un effet sur la charge de travail (H2a), le succès de la tâche (H2b), le nombre d'erreurs (H2c), le temps de réalisation (H2d) et le nombre de gestes (H2e) des participants.

H2a : L'adaptation du cobot à la **main dominante** de l'opérateur diminue la **charge de travail**.

H2b : L'adaptation du cobot à la **main dominante** de l'opérateur augmente le taux de **succès de la tâche**.

H2c : L'adaptation du cobot à la **main dominante** de l'opérateur diminue le **nombre d'erreurs**.

H2d : L'adaptation du cobot à la **main dominante** de l'opérateur diminue le **temps de réalisation**.

H2e : L'adaptation du cobot à la **main dominante** de l'opérateur diminue le nombre de gestes.

H3 : La réussite à la tâche est plus **grande** (H3a), le temps de réalisation **réduit** (H3b), le nombre de gestes plus **petit** (H3c), la charge de travail **moindre** (H3d) et les erreurs **moins nombreuses** (H3e) en collaboration avec le cobot qu'en collaboration avec un autre humain.

H3a : Le **taux de réussite** est plus élevé en **collaboration** avec le cobot qu'en collaboration avec un autre humain.

H3b : Le **temps de réalisation** est moins long en **collaboration** avec le cobot qu'en collaboration avec un autre humain.

H3c : Le **nombre de gestes** est moins élevé en **collaboration** avec le cobot qu'en collaboration avec un autre humain.

H3d : La **charge de travail** est moins élevée en **collaboration** avec le cobot qu'en collaboration avec un autre humain.

H3e : Les **erreurs** sont moins nombreuses en **collaboration** avec le cobot qu'en collaboration avec un autre humain.

H4 : Le score d'acceptabilité de la collaboration, ainsi que les sous-échelles, sera plus élevé en condition de collaboration avec le cobot qu'en condition de collaboration avec un autre humain.

Cette étude a été pré-enregistrée sur OSF³⁵. 120 sujets ont participé à l'étude (90 femmes, 29 hommes et 1 non binaire). 81% des participants étaient droitiers, 16% gauchers et 3% ambidextres. La prévalence des gauchers est plus élevée que dans la population française

³⁵ <https://osf.io/3rd5h/>

générale qui compte 12,9 % de gauchers (Lesgauchers, 2017). Seuls 8% des participants ont déclaré avoir déjà travaillé avec un robot. Les participants étaient des adultes, sans aucun trouble de la vision des couleurs et sans douleur dans les membres supérieurs avant l'expérience. Les participants ont été divisés en deux groupes différents.

1.2. Procédure expérimentale

La procédure expérimentale est illustrée ci-dessous (Cf. Figure 40) :

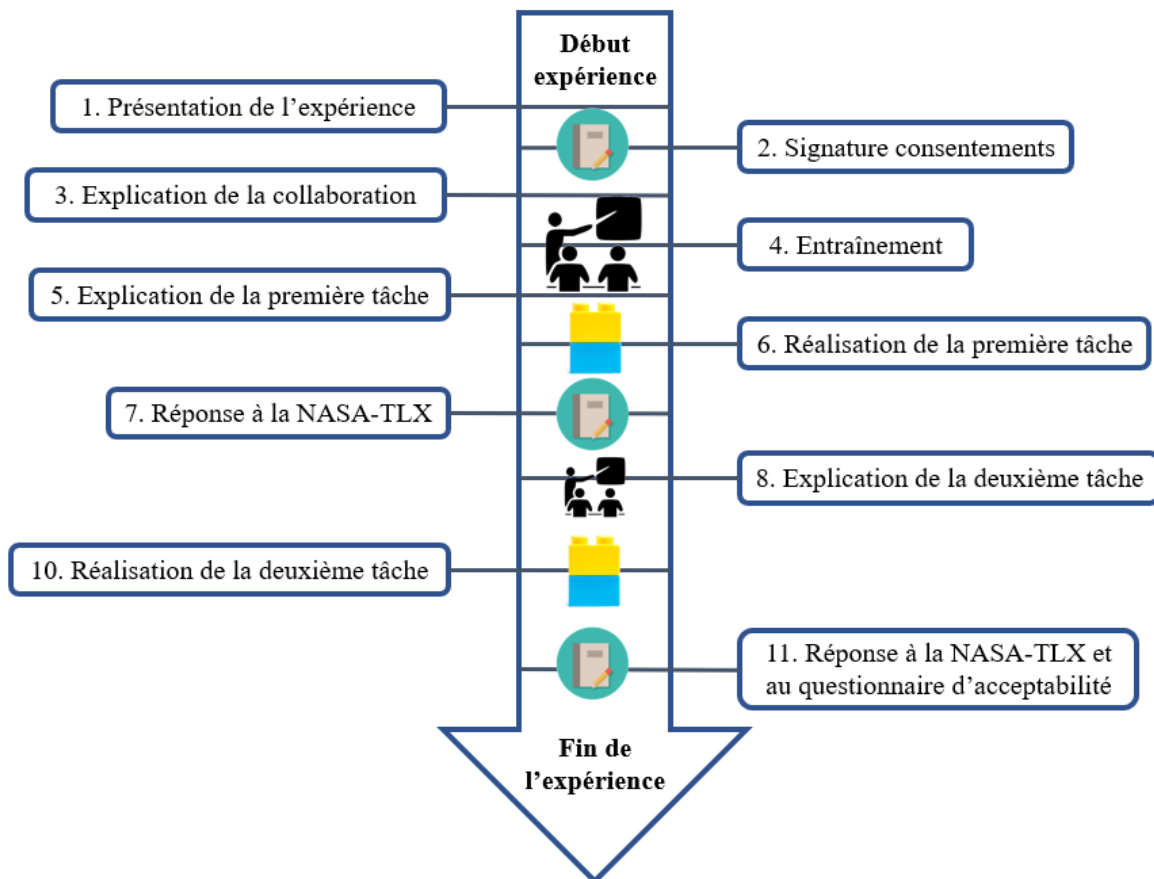


Figure 40. Illustration de la procédure expérimentale

Dans notre étude, deux conditions ont été établies et les participants ont été assignés de manière aléatoire à deux groupes différents correspondant à ces conditions. L'utilisation d'une modalité intergroupe plutôt qu'intragroupe a été justifiée par des contraintes logistiques et par le désir d'éviter les effets d'apprentissage et de fatigue. Le premier groupe ($N = 61$) a réalisé deux tâches d'assemblage Duplo (simple et complexe dans un ordre aléatoire) en collaboration avec un autre humain (condition H/H). Le deuxième groupe ($N = 59$) a réalisé les mêmes tâches avec un cobot (condition H/C ; Cf. Figure 41).

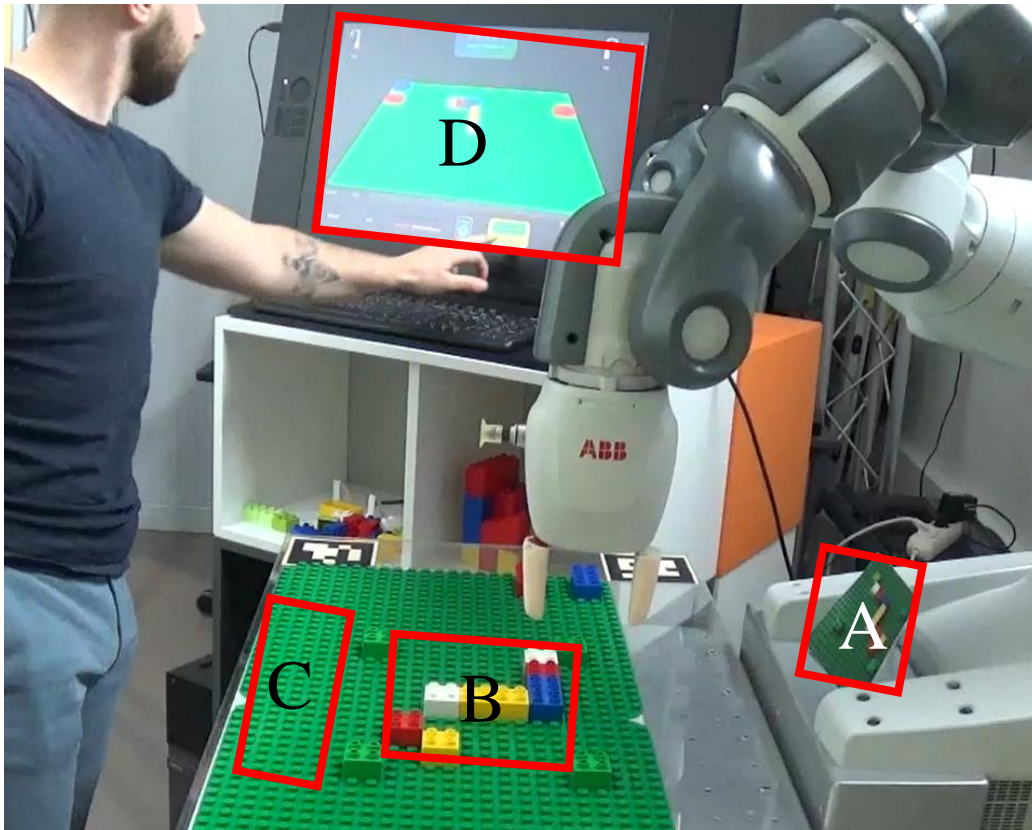


Figure 41. Un participant réalisant la tâche avec YuMi

Dans les deux conditions, les participants devaient reproduire le modèle disposé devant eux (A dans la figure 2) dans une zone désignée (B) avec des Duplos disposés dans la zone située devant eux (C). Dans la condition H/H, ils pouvaient se parler. Dans la condition H/C, ils devaient interagir en utilisant l'interface située à côté d'eux (D). Pendant la tâche simple, le participant devait reproduire un modèle à 1 niveau en collaboration le plus rapidement possible (Cf. Figure 42).

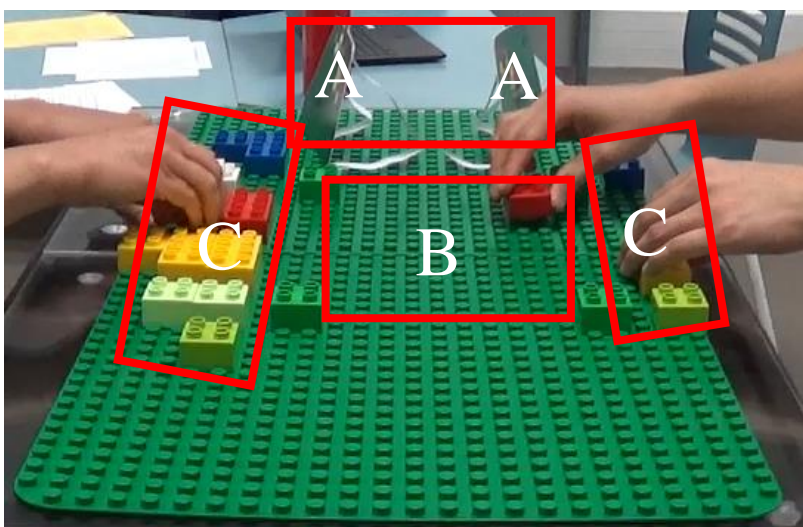


Figure 42. Deux participants réalisant la tâche (condition H/H)

Pendant la tâche complexe, le participant devait reproduire un modèle à 5 niveaux en collaboration le plus rapidement possible tout en répondant à des additions mathématiques simples. Dans les deux conditions, le participant avait accès aux $\frac{3}{4}$ du stock de Duplos pour réaliser la tâche. Le collaborateur humain ou le cobot disposait de $\frac{1}{4}$ du stock de Duplos.

La même version traduite (Cegarra & Morgado, 2009) du NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988) a été utilisée pour évaluer la charge de travail perçue. Le questionnaire a été réalisé à l'aide du logiciel LimeSurvey. Ce logiciel a été mis à disposition pour l'étude grâce à la plateforme SCREEN (Service Commun des Ressources pour l'Expérimentation et l'Équipement Numérique) géré par l'Université Grenoble Alpes.

Les participants ont été filmés pendant les tâches. Ces vidéos ont été utilisées pour déterminer le nombre de gestes (mouvement des bras du participant), le nombre d'erreurs (un bloc placé au mauvais endroit) et le temps de réalisation (du "départ" de l'expérimentateur à la "fin" du participant). L'analyse des vidéos a été faite avec le logiciel universitaire open source Boris (Friard & Gamba, 2016).

La méthode qui vient d'être expliquée a permis de récolter de nombreux résultats innovants qui sont présentés dans la partie suivante.

Dans ce deuxième test, nous avons testé les conséquences d'une conception cobotique en prenant en compte la variabilité organisationnelle (difficultés de la tâche dans un ordre indifférent) et prenant en compte des variabilités inter-individuelles. Le plan issu du premier test utilisateur était déjà adaptable à la variabilité cognitive inter-individuelle (auto-organisation du séquençage des actions par le participant, habitude ou non de collaborer avec un cobot), et à diverses variabilités physiques inter-individuelles (taille, genre, âge). Ici le plan a été programmé pour prendre compte une autre variabilité inter-individuelle : la main dominante de l'opérateur. Nous avons jugé pertinent d'augmenter le nombre de variabilités nécessitant une programmation spécifique à l'occasion d'un troisième test utilisateur.

Chapitre 2. Résultats du deuxième TU : tests de la prise en compte dans l'assistance cobotique de la complexité de la tâche et de la main dominante

Avant de décrire les résultats, nous souhaitons préciser que pour les participants qui ont collaboré avec le cobot, les bugs (problèmes de programmation ou manque de perception par le système cobotique qui entraîne des erreurs) ont eu un impact sur 71 % des passations pour 71 %. Sur l'ensemble des variables testées, deux participants avaient des données aberrantes sur plusieurs variables. Nous avons décidé de ne pas les inclure dans les tests statistiques afin de

garantir la validité des résultats. La taille finale de l'échantillon pour l'étude est de 120 participants. Les résultats de l'étude ont été calculés à l'aide d'IBM SPSS 25. Des analyses de variance multiples (MANOVA), des ANOVA et des comparaisons de moyennes ont été utilisées pour étudier les hypothèses. Pour calculer les effets d'interaction, des modèles mixtes généralisés ont été utilisés. Le D de Cohen a également été calculé pour les effets significatifs dans le cas de tests de comparaisons de moyennes.

La cohérence interne du NASA-TLX a été confirmée : aucun item n'était corrélé à plus de 0,70 avec un autre et l'alpha de Cronbach était satisfaisant (0,761).

2.1. L'effet de la complexité de la tâche (H1)

Le tableau ci-dessous présente les résultats descriptifs de la première hypothèse (Cf. Tableau 16 ; Cf. Figure 43).

Tableau 16. Résultats descriptifs de la première hypothèse

		Score de charge de travail	Succès en %	Nombre d'erreurs	Temps de réalisation (en secondes)	Nombre de gestes
Humain-Humain	Tâche simple	73.88	98%	1	32	15
	Tâche complexe	169.98	55.73%	3	154	50
Humain-Cobot	Tâche simple	121.96	98%	0	61	17
	Tâche complexe	138.39	98.28%	3	376	68

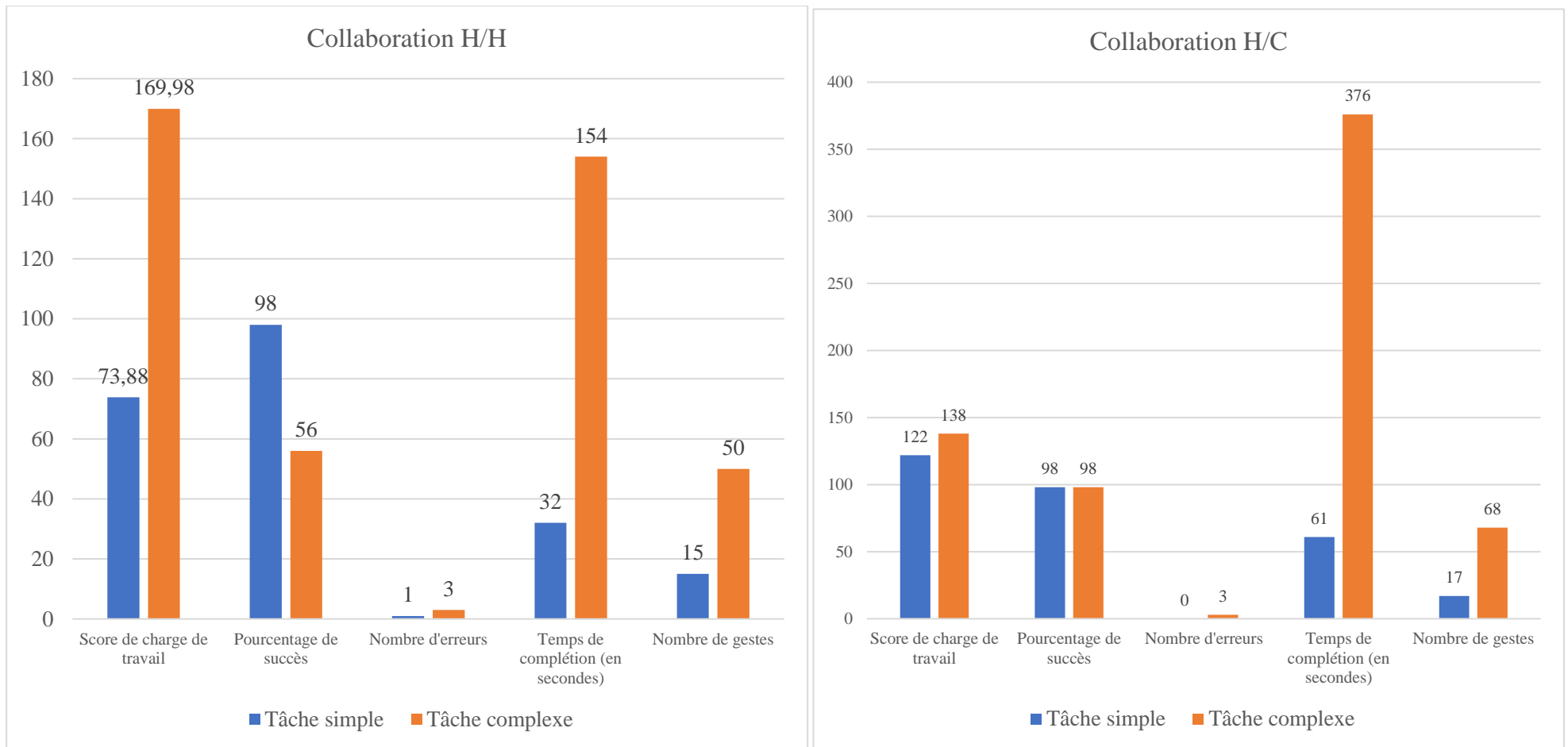


Figure 43. Diagramme à barres de la charge de travail, réussite, erreurs, temps de réalisation et gestes dans les tâches simples et complexes au cours de la collaboration H/H et H/C

La complexité de la tâche a un effet sur la charge de travail. Celle-ci est plus élevée durant la tâche complexe que durant la tâche simple [$t(117) = -7,156$; $p < 0,000$]. Afin de tester l'effet d'interaction entre la complexité de la tâche et le type de collaboration sur la charge de travail, un modèle mixte généralisé a été utilisé. Un effet d'interaction a été constaté entre la complexité de tâches et le type de collaboration sur la charge de travail [$f(1) = 61,134$; $p > 0,000$]. Le type de collaboration modère l'effet de complexité de la tâche sur la charge de travail (H1a). L'effet de la complexité de la tâche sur l'augmentation de la charge de travail est plus faible dans la condition H/C que dans la condition H/H (Cf. Figure 44).

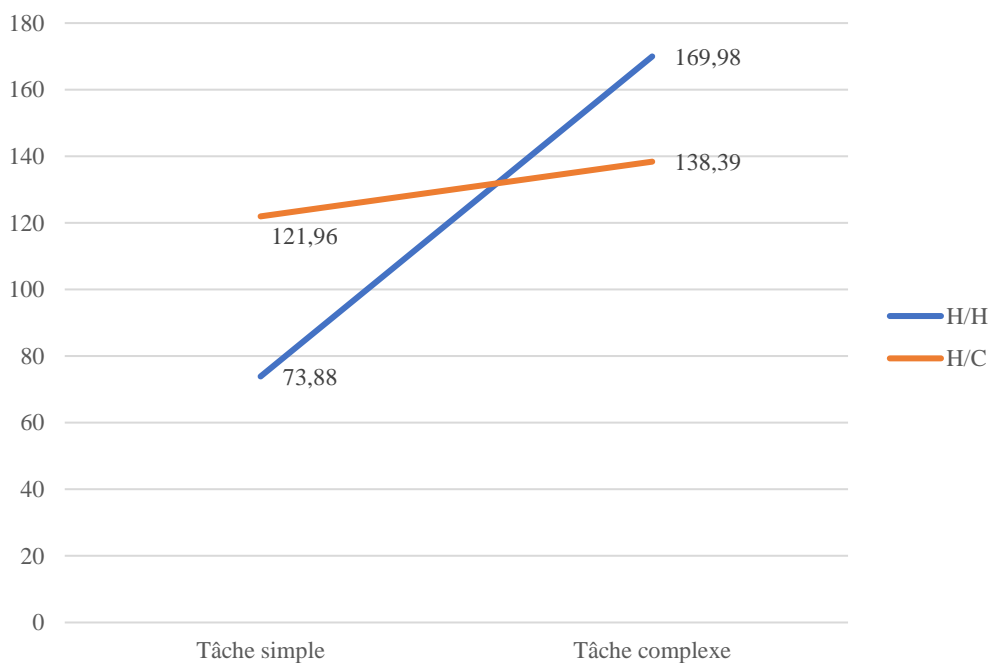


Figure 44. Effet d'interaction du type de collaboration et de la complexité de la tâche sur la charge de travail

La complexité de la tâche a un effet sur le taux de succès à la tâche. Celui-ci est plus élevé pour une tâche simple que pour une tâche complexe [$t(112) = -5,282$; $p < 0,000$]. Un effet d'interaction a été également constaté entre la complexité de tâche et le type de collaboration sur le taux de succès [$f(1) = 2,482$; $p > 0,000$]. Le type de collaboration modère l'effet de la complexité de la tâche sur le taux de réussite (H1b). L'effet de la complexité de la tâche sur la diminution du taux de réussite est plus faible dans la condition H/C que dans la condition H/H (Cf. Figure 45).

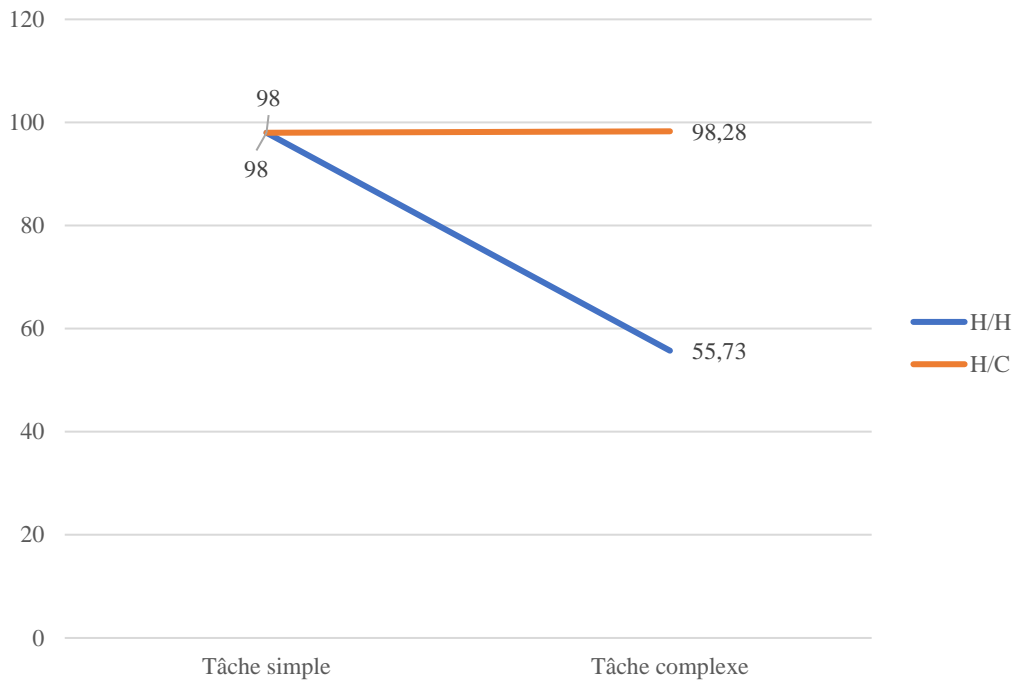


Figure 45. Effet d'interaction du type de collaboration et de la complexité de la tâche sur le pourcentage de réussite

Il y a un effet de la complexité de la tâche sur le nombre d'erreur. Celui-ci est plus élevé durant la tâche complexe que durant la tâche simple [$t(112) = -7,172$; $p < 0,000$]. Cependant, aucun effet d'interaction (H1c) n'a été trouvé entre la complexité de tâche et le type de collaboration sur le nombre d'erreurs [$f(1) = 1,088$; $p > 0,299$].

Il y a un effet de la complexité de la tâche sur le temps de réalisation de la tâche. Celui-ci est plus élevé pour une tâche complexe que pour une tâche simple [$t(112) = -16,590$; $p < 0,000$]. Un effet d'interaction a été trouvé entre la complexité de la tâche et le type de collaboration sur le temps de réalisation (H1d). Le type de collaboration modère l'effet de la complexité de la tâche sur le temps de réalisation [$f(1) = 158,250$; $p > 0,000$]. La complexité de la tâche augmente d'autant plus le temps de réalisation dans la condition H/C que dans la condition H/H (Cf. Figure 46).

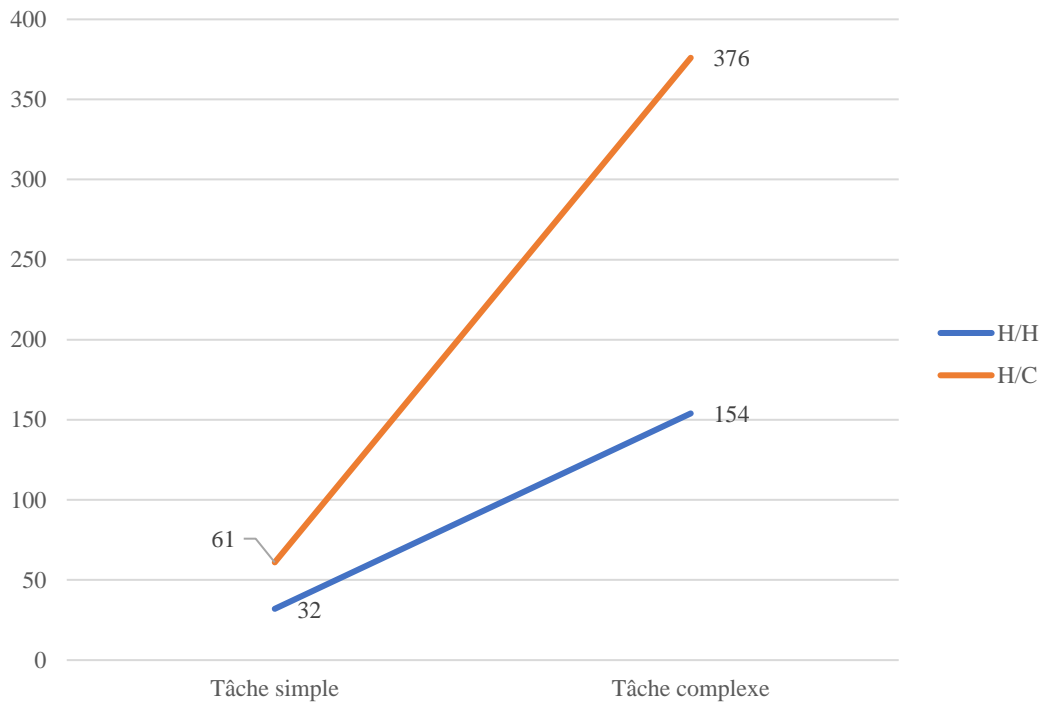


Figure 46. Effet d'interaction du type de collaboration sur l'effet de la complexité de la tâche sur le temps de réalisation

Il y a un effet de la complexité de la tâche sur le nombre de gestes. Celui-ci est plus élevé pour une tâche complexe que pour une tâche simple [$t(112) = -22,884$; $p < 0,000$]. Un effet d'interaction a été trouvé entre la complexité de la tâche et le type de collaboration sur le nombre de gestes (H1e), le type de collaboration modère l'effet de la complexité de la tâche sur le nombre de gestes [$f(1) = 29,066$; $p > 0,000$]. La complexité de la tâche augmente le nombre de gestes dans la condition H/C par rapport à la condition H/H (Cf. Figure 47).

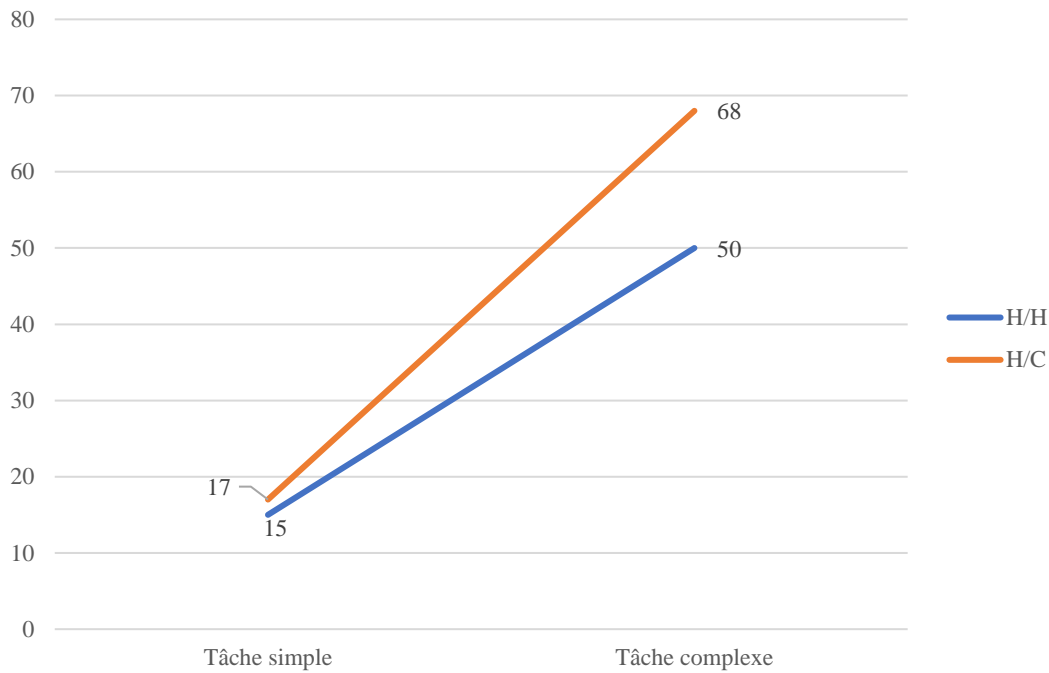


Figure 47. Effet d'interaction du type de collaboration et de la complexité de la tâche sur le nombre de gestes

2.2. L'effet de l'adaptation du cobot au type de main dominante (H2)

L'adaptation du cobot au type de main dominante n'a pas d'effet sur les différentes variables indépendantes [$f(5) = 1,229$; $p = 0,311$].

2.3. Effet de la collaboration sur la charge de travail, le taux de succès, le nombre d'erreurs, le temps de réalisation et le nombre de gestes (H3)

Le tableau ci-dessous présente les résultats descriptifs de la troisième hypothèse (Cf. Tableau 17 ; Cf. Figure 48).

Tableau 17. Résultats descriptifs de la troisième hypothèse

	Score de charge de travail	Succès en %	Nombre d'erreurs	Temps de réalisation (en secondes)	Nombre de gestes
Collaboration avec un human	121.93	77%	2.22	92.80	32.57
Collaboration avec un cobot	130.17	98%	1.81	215.07	42.35

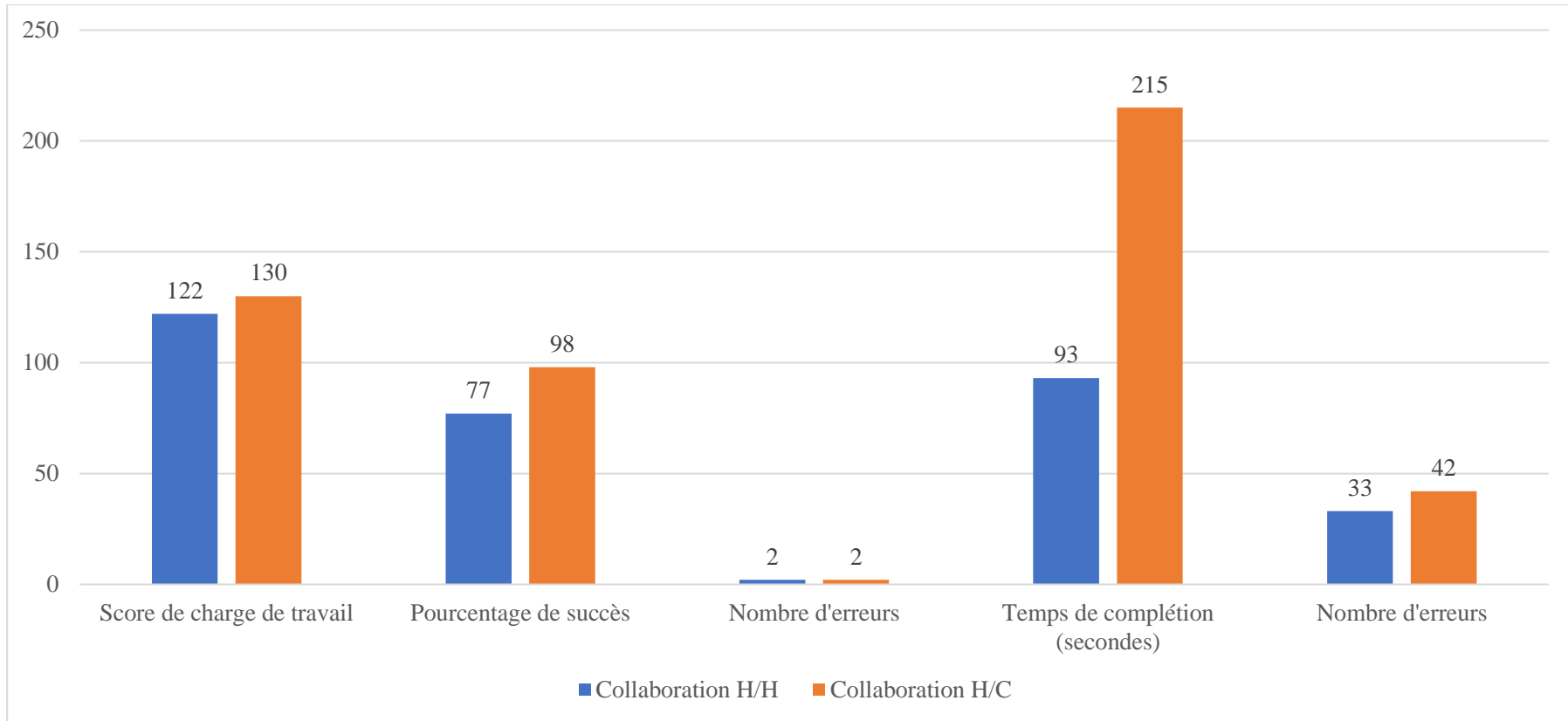


Figure 48. Diagramme à barres de la charge de travail, de la réussite, des erreurs et du temps de réalisation en collaboration avec un cobot et avec un autre humain

Le type de collaboration augmente la réussite de la tâche (H3a), mais aussi le temps de réalisation (H3b) et le nombre de gestes (H3c). En revanche, il n'a pas d'effet sur la charge de travail (H3d) et le nombre d'erreurs (H3e). Les résultats des analyses sont présentés ci-dessous (Cf. Tableau 18).

Tableau 18. Résultats de la multi-analyse de variance du type de collaboration sur la charge de travail, la réussite, les erreurs, le temps et les gestes (en gras les effets significatifs)

Variable indépendante	Variable dépendante	<i>df</i>	Carré moyen	<i>F</i>	<i>Sig.</i>	Éta-carré partiel
Type de collaboration	Charge de travail	1	398.916	.166	.685	.001
	Succès	1	1.241	32.283	<.001	.225
	Erreurs	1	4.802	1.088	.299	.010
	Temps	1	419672.363	158.250	<.001	.588
	Gestes	1	2685.245	29.066	<.001	.208

Le type de collaboration n'a pas d'incidence sur la charge de travail globale. De plus, la charge de travail après la tâche simple avec un cobot est plus élevée qu'avec un autre humain [$u = 2542,000$; $z = 4,327$; $p < 0,000$]. Le D de Cohen est de -0,827, l'effet est important. Cependant, la charge de travail après la tâche complexe avec un cobot est plus faible qu'avec un autre humain [$u = 1338 500$; $z = -2 154$; $p < 0,000$]. Le D de Cohen est de 0,464, l'effet est modéré.

Il n'y a pas d'effet significatif de la collaboration sur le nombre d'erreurs. Cependant, les participants ont fait moins d'erreurs en fonction du temps passé sur la tâche avec le cobot qu'avec un autre humain [$t(111) = 5,988$; $p < 0,001$]. Le D de Cohen est de 1.130, l'effet est important.

De même, les bugs du cobot ont eu un impact positif sur le temps passé sur la tâche [$t(50) = 1,966$; $p = 0,027$] et sur le nombre de gestes [$u = 186,500$; $z = -2,014$; $p = 0,044$]. Les deux D de Cohen indiquent un effet modéré. La fréquence des gestes (nombre de gestes / temps de réalisation) était plus faible avec un cobot [$t(111) = -5,391$; $p < 0,001$]. Les participants ont fait moins de gestes compte tenu du temps passé avec le cobot qu'avec un autre humain. Le D de Cohen est de 2.660, l'effet est important.

3. Synthèse du deuxième TU

L'industrie 5.0 encourage l'utilisation des robots collaboratifs. Cette recherche étudie les impacts de la collaboration entre cobots à l'aide d'un dispositif expérimental. 120 participants ont réalisé une tâche d'assemblage simple et une tâche d'assemblage complexe. 50% ont collaboré avec un autre humain (H/H) et 50% avec un cobot (H/C). La charge de travail et l'acceptabilité de la collaboration cobotique ont été mesurées. Le travail avec un cobot diminue l'effet de la complexité de la tâche sur la charge de travail humaine et sur la qualité de la production. Cependant, il augmente le temps de réalisation et le nombre de gestes (tout en diminuant leur fréquence). Les couples H/C ont plus de chances de réussir, mais il leur faut plus de temps et de gestes pour réaliser la tâche. Les résultats de cette recherche pourraient aider les développeurs et les parties prenantes à comprendre les impacts de la mise en œuvre d'un cobot dans les chaînes de production.

ÉTUDE 4 : TROISIÈME TEST UTILISATEUR : TESTS DE LA PRISE EN COMPTE DE LA DANGÉROSITÉ DES PIÈCES ET DE LA PRISE EN COMPTE DE L'EXPERTISE DANS L'ASSISTANCE COBOTIQUE

Chapitre 1. Présentation de l'étude et de la méthode utilisée

1.1. Objectifs et hypothèses

Pour ce troisième test, nous voulons savoir si un cobot est capable de s'adapter aux caractéristiques humaines et si un opérateur humain s'expose plus ou moins à des risques professionnels lorsque le cobot est programmé pour diminuer l'exposition de l'opérateur aux risques professionnels. Cette troisième expérimentation s'appuie sur les constats du terrain d'étude, qui montrent que les opérateurs manipulent des produits dangereux et que cela a un coût pour leur sécurité. Nous cherchons à mesurer si les mesures précédentes sur la performance se maintiennent dans ce troisième scénario. De plus, nous souhaitons tester l'effet de la variabilité inter-individuelle de l'expertise de l'opérateur (présente dans la situation de travail étudiée). En effet, cette variabilité semble avoir un effet sur l'acceptabilité des dispositifs technologiques (Cippelletti, 2012). La collaboration cobotique est-elle plus acceptée par les non-experts ? Cette variabilité n'a jamais été testée dans le cadre d'une collaboration cobotique, il convient de s'y intéresser.

Nous faisons les hypothèses que :

H1 (hypothèse de prise en charge de la variabilité de l'expertise humaine) : **L'expertise** de l'opérateur (expert vs non expert) a un effet sur sa tâche et sur lui-même durant une collaboration cobotique.

H1a : **L'expertise** de l'opérateur n'a pas d'effet sur la **charge de travail** perçue dans le cadre d'une collaboration cobotique.

H1b : **L'expertise** de l'opérateur n'a pas d'effet sur le **nombre d'erreurs** dans le cadre d'une collaboration cobotique.

H1c : **L'expertise** de l'opérateur n'a pas d'effet sur le **temps de réalisation** dans le cadre d'une collaboration cobotique.

H1d : **L'expertise** de l'opérateur n'a pas d'effet sur le **nombre de gestes** dans le cadre d'une collaboration cobotique.

H1f : L'**expertise** de l'opérateur n'a pas d'effet sur le **nombre d'exposition** aux risques dans le cadre d'une collaboration cobotique.

H1e : Les opérateurs **experts** auront des **scores d'acceptabilité** de la collaboration cobotique moins élevées que les opérateurs non experts.

H2 (Test des qualités capacitanes du cobot) : Plus le cobot s'adapte aux contraintes de l'humain, plus la charge de travail de l'humain (H2a), le nombre d'erreurs (H2b), le temps de réalisation (H2c), les gestes (H2d), le nombre d'expositions aux risques (H2f) diminuent et plus l'acceptabilité (H1e) augmente.

1.2. Participants

38 participants (dont 30 femmes) ont participé à l'étude. Les participants sont des adultes, sans aucun trouble de la vision des couleurs et sans douleur dans les membres supérieurs avant l'expérience. Des bugs du système cobotique ont impacté l'expérience de 21 participants. On comprend ainsi pourquoi il est nécessaire de stabiliser la technologie et sa programmation avant de la mettre en réelle collaboration en situation de travail. Les nombreux bugs du système pourraient conduire à un rejet de la technologie en situation réelle, si ceux-ci empêchent le bon déroulement du travail.

1.3. Protocole expérimental

Le protocole expérimental est constitué de deux variables indépendantes inter-sujets (Cf. Figure 49).

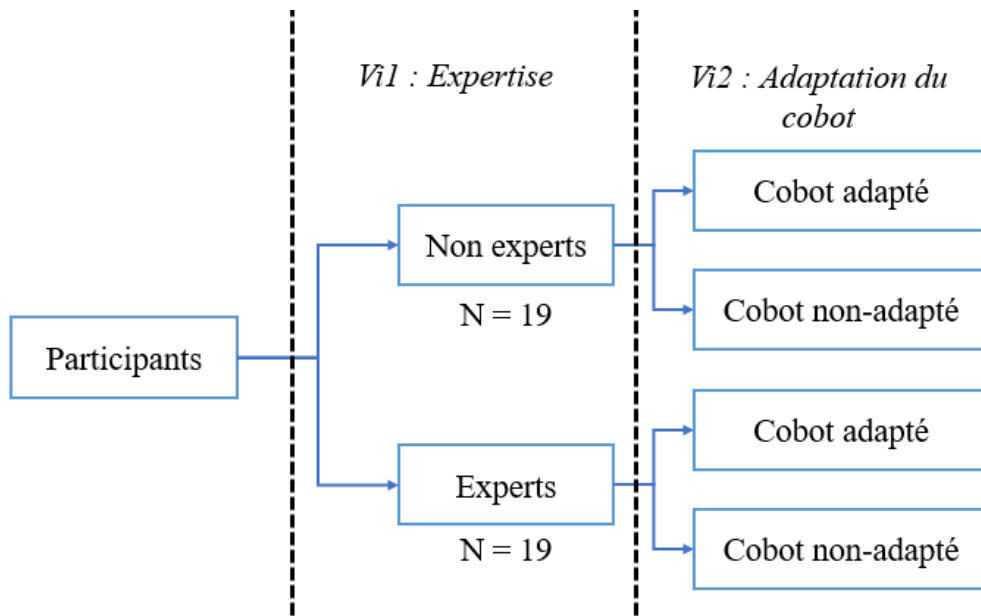


Figure 49. Présentation des différentes variables utilisées dans l'expérience

Ci-dessous est présenté un schéma présentant le protocole expérimental dans son ensemble (Cf. Figure 50).

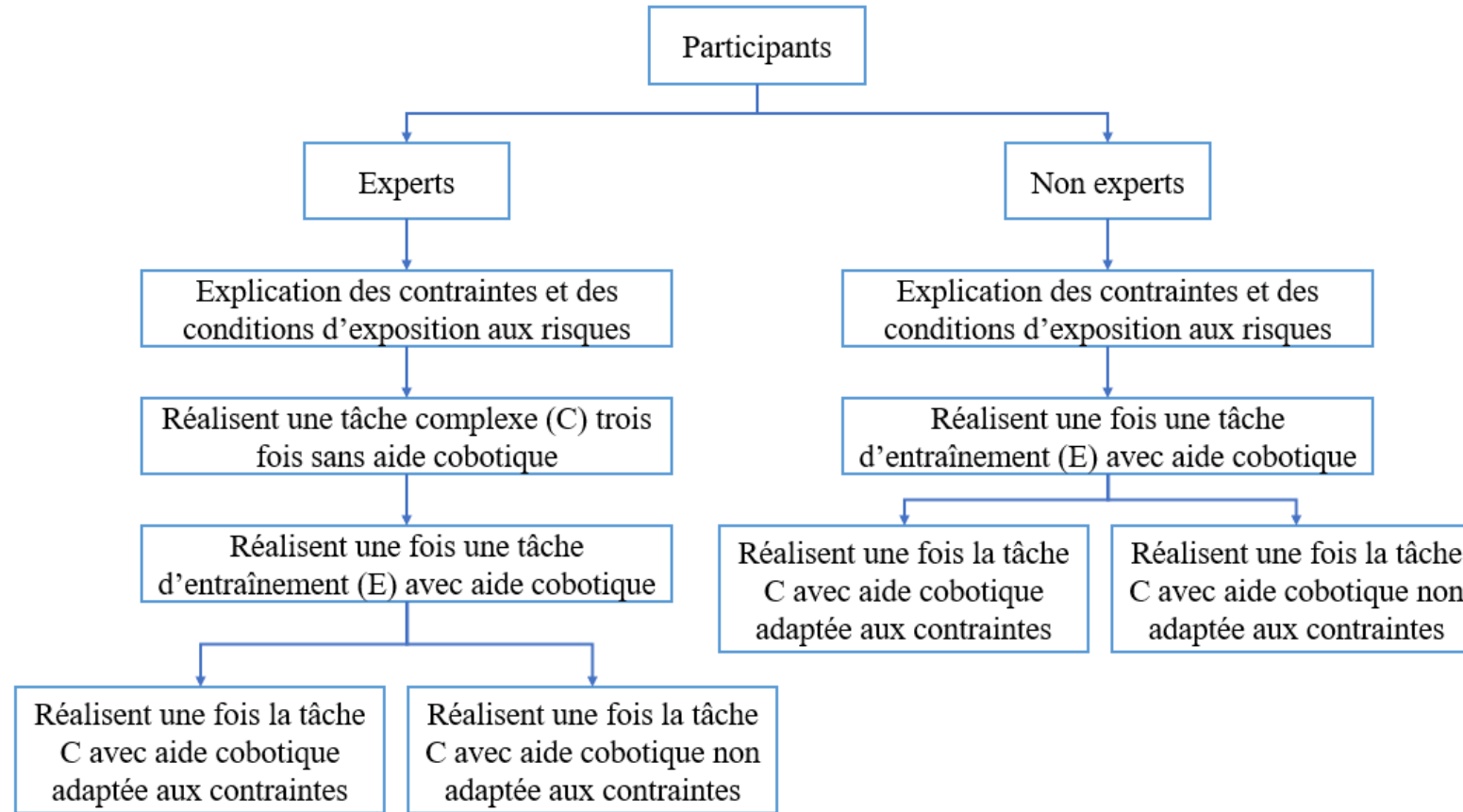


Figure 50. Protocole expérimental (tâche E : entraînement ; tâche C : complexe).

Les tâches sont présentées comme un travail de chimie et les blocs de Duplo sont présentés comme des composants chimiques plus ou moins dangereux. Pour tous les blocs, les participants doivent porter des gants en latex pour se protéger. Pour les blocs rouges, qui sont présentés comme les plus toxiques, les participants doivent porter des gants supplémentaires (particulièrement contraignants pour la tâche). La tâche C consiste en une figure de Duplo complexe de 5 étages et de quatre couleurs. Les participants de la condition experts devaient commencer par réaliser cette tâche (C) seuls trois fois sans faire de fautes, ce que ne faisaient pas les participants de la condition « non experts ». A la suite, tous les participants (experts et non experts) ont réalisé une tâche d'assemblage simple avec le cobot comme tâche d'entraînement à la collaboration (E). Cette tâche consiste à réaliser en collaboration avec un cobot un modèle de Duplo simple à un étage et quatre couleurs (Figure 51).

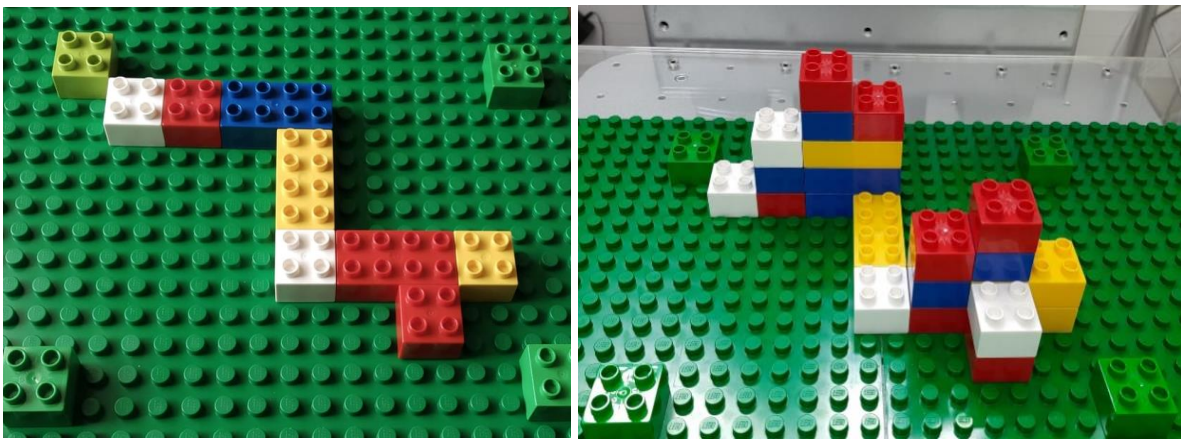


Figure 51. Le modèle simple (à gauche) et le modèle complexe (à droite) utilisés dans l'expérience

Une fois la tâche d'entraînement réussie, les participants étaient placés aléatoirement dans l'une des deux conditions. 19 participants étaient dans la condition « adaptation du cobot » et 19 étaient dans la condition « non-adaptation ». Dans la condition « adaptation », le cobot était programmé pour prendre en compte les contraintes sécuritaires de l'humain c'est-à-dire que le cobot devait prendre en priorité les blocs rouges afin que l'humain ne s'expose pas aux risques et ne soit pas dans l'obligation de mettre le gant contraignant. Dans la condition « non-adaptation », le cobot ne donnait la priorité à aucun bloc, il ne prenait pas en compte les contraintes de l'opérateur humain. Tous les participants devaient réaliser la tâche C (tâche expérimentale) en collaboration avec le cobot selon les règles vues précédemment. Le participant devait reproduire le modèle complexe avec le cobot le plus rapidement possible tout en répondant à des additions mathématiques simples (Cf. Figure 52).

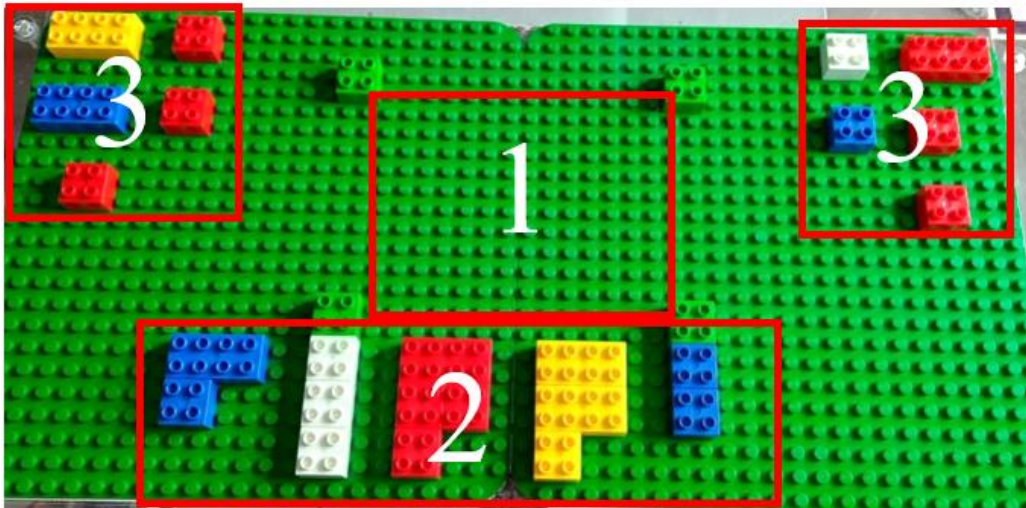


Figure 52. Positionnement du matériel en condition de tâche complexe (1 : zone de travail ; 2 : stock de l'humain ; 3 : stock du cobot)

Dans les deux conditions, le participant avait accès à plus de la moitié du stock de Duplos et au modèle (14 pièces) pour réaliser la tâche. Le cobot avait accès au reste du stock de Duplos (10 pièces) et au modèle à compléter.

Différentes variables dépendantes ont été utilisées pour tester les hypothèses : le nombre d'erreurs (pièce placée puis déplacée), le temps de réalisation du modèle et le pourcentage de réussite du modèle (le modèle est correct quand il ne comporte aucune erreur de placement et de couleur). Le nombre de gestes a également été mesuré avec le nombre de mouvements des membres supérieurs dans la zone de travail : nombre de mouvements des membres supérieurs entre le « start » de l'expérimentateur et le « j'ai fini » du participant. Les indicateurs d'exposition au risque sont le nombre de blocs rouges touchés par l'opérateur et le niveau de réalisation de la figure sur lequel l'opérateur a mis ses gants pour la première fois.

L'indicateur de charge de travail sont les résultats du NASA TLX (Hart, 2006 ; Hart & Staveland, 1988 ; Rubio et al., 2004 ; Webb et al., 2010). Ce questionnaire a été évalué sur LimeSurvey grâce à la plateforme SCREEN gérée par l'Université Grenoble Alpes. Les items sont les mêmes que pour les deux premières expériences.

Le système robotique est composé d'un robot collaboratif YuMi (<https://new.abb.com/products/robotics/robots/collaborative-robots/yumi/irb-14000-yumi>) configuré via l'interface ROS Rapid, d'un module de vision qui utilise une caméra Jetson Nano, d'une interface de vision et d'une interface Planning. L'interface de vision est programmée pour gérer la perception des changements, les erreurs d'assemblage et pour travailler avec le statut de mouvement de Yumi. L'interface Planning utilise le langage PDDL (*Planning Domain Description Language*) pour construire un domaine statique et un problème dynamique qui

change selon les données fournies par le système de vision. La solution de la planification est gérée par le Solver Fast Downward qui utilise la planification hiérarchique pour trouver la meilleure solution au problème. C'est le « cerveau » du système qui dit au robot ce qu'il doit faire et qui donne des indices à l'humain. Une interface utilisateur graphique permet à l'humain de communiquer avec le robot et de recevoir des informations importantes sur l'état du système, des suggestions sur la tâche qu'il doit accomplir et permet de demander de l'aide au robot. Le système est supervisé par un contrôleur qui gère toutes les données entrantes des différents modules, les réorganise, et les envoie là où elles sont nécessaires. Il permet aux différents modules de communiquer efficacement entre eux. En condition de non-adaptation, le cobot décide quel bloc déplacer sans prioriser un bloc plus qu'un autre, il tient compte des actions humaines. En condition d'adaptation, le cobot associe une contrainte de l'humain (exposition au risque) au déplacement d'un bloc rouge. Il choisit de déplacer les blocs rouges en priorité pour éviter que l'humain ne prenne des risques.

Chapitre 2. Résultats du troisième TU : effets de la prise en compte de la dangerosité des pièces et de la prise en compte de l'expertise dans l'assistance cobotique

Ce TU visait à tester les capacités d'adaptation du cobot dans un contexte de travail « dangereux », inspiré de l'activité de chimiste. La variabilité inter-individuelle de l'expertise de l'opérateur a été manipulée afin de mesurer la prise en charge de celle-ci dans la collaboration cobotique. En cas d'une prise en charge adéquate, l'expertise de l'opérateur ne devrait pas avoir d'effet car le cobot s'adapterait au niveau de l'opérateur. Dans ce cadre, plusieurs tâches ont été réalisées et une mesure de la charge de travail a été réalisée. La cohérence interne du NASA-TLX a été confirmée : aucun item n'était corrélé à plus de 0,70 avec un autre et l'alpha de Cronbach était satisfaisant (0,76).

2.1. Effet du niveau d'expertise de l'opérateur dans le cadre d'une collaboration cobotique

Les résultats descriptifs de cette hypothèse sont présentés ci-dessous (Cf. Tableau 19).

Tableau 19. Résultats descriptifs de l'effet de l'expertise sur les différentes dimensions

Condition	Charge de travail		Erreurs		Temps		Gestes		Risques		Niveau gants	
	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>
Expert	20.16	4.6	0.84	1.07	316.16	83.69	27.05	5.23	1.53	0.7	3.42	1.57
Non-expert	21.68	5.37	2.42	3.11	350.16	87.12	31.16	9.87	2.05	0.78	2.11	1.59

Les résultats suivants ont été obtenus grâce à des MANOVA et à l'aide du logiciel SPSS (Cf. Tableau 20).

Tableau 20. Résultat de la MANOVA réalisée avec l'expertise en variable indépendante (en gras les résultats significatifs)

Variables dépendantes	DF	F	Significativité	Taille d'effet
Charge de travail	1	1.633	.209	.043
Nombre d'erreurs	1	4.369	.044	.108
Temps de réalisation	1	1.505	.228	.040
Nombre de gestes	1	2.565	.118	.067
Nombre d'exposition aux risques	1	4.813	.035	.118
Niveau d'exposition aux risques	1	6.548	.015	.154

Le tableau (Cf. Annexe 7) indique qu'il n'y pas d'effet significatif de l'expertise du participant sur la charge de travail perçue (H1a), le temps de réalisation (H1d) et le nombre de gestes (H1e).

Cependant, il y a un effet significatif de l'expertise du participant sur le nombre d'erreurs (H1c ; Cf. Figure 53). Les participants experts font moins d'erreurs ($M = 0,84$; $ET = 1,07$) que les non-experts ($M = 2,42$; $ET = 3,11$).

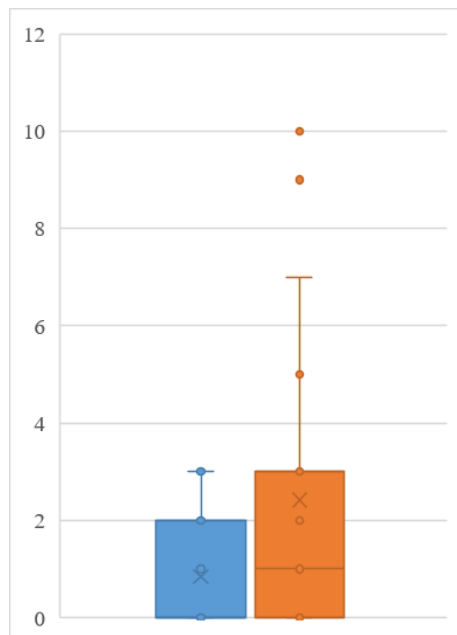


Figure 53. Diagramme en boîte du nombre d'erreurs des experts (bleu) et des non-experts (orange)

Également, il y a un effet significatif de l'expertise du participant sur le nombre d'expositions aux risques (H1f ; Cf. Figure 54). Les participants experts sont moins

fréquemment exposés aux risques ($M = 1,53$; $ET = 0,7$) que les non-experts ($M = 2,05$; $ET = 0,78$).

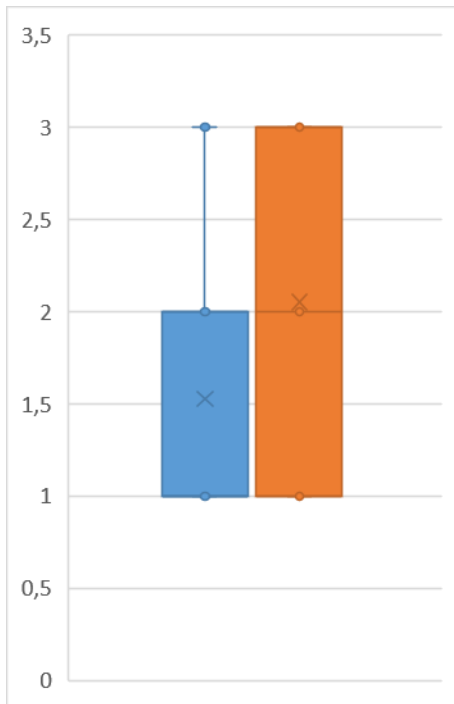


Figure 54. Diagramme en boîte du nombre d'exposition aux pièces dangereuses des experts (bleu) et des non-experts (orange)

Il y a un effet significatif de l'expertise du participant sur le moment auquel le participant a d'abord mis ses gants (niveau de l'assemblage) (Cf. Figure 55). Non seulement, les experts sont moins exposés aux risques, mais ils s'y exposent plus tard ($M = 3,42$; $ET = 1,57$) que les participants non experts ($M = 2,11$; $ET = 1,6$).

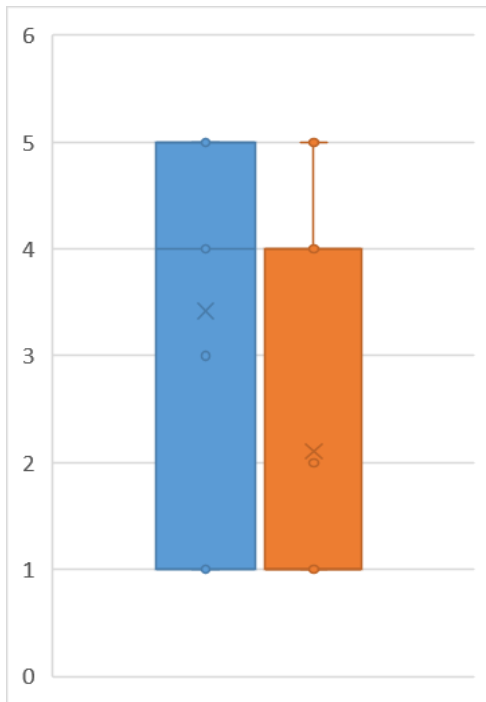


Figure 55. Diagramme en boîte du niveau d'exposition aux risques des experts (bleu) et des non-experts (orange)

Les participants ont tous réussi la tâche. Le niveau d'expertise du participant n'a pas eu d'effet sur la qualité de sortie du modèle à réaliser.

2.2. Effet du degré d'adaptation du cobot dans le cadre d'une collaboration cobotique

Les résultats descriptifs de cette hypothèse sont présentés ci-dessous (Cf. Tableau 21).

Tableau 21. Résultats descriptifs de l'effet de l'adaptation sur les différentes dimensions

Condition	Charge de travail		Erreurs		Temps		Gestes		Risques		Niveau gants	
	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>
Adaptation	120.66	62.07	1.11	2.26	319.58	75.99	28.21	7.36	1.42	0.69	3.42	1.644
Pas adaptation	129.95	64.18	2.16	2.54	346.74	95.09	30	8.83	2.16	0.69	2.11	2.11

Les résultats suivants ont été obtenus grâce à des MANOVA et à l'aide du logiciel SPSS (Cf. Tableau 22).

Tableau 22. Résultat de la MANOVA réalisée avec le niveau d'adaptation du cobot en variable indépendante

Variabiles dépendantes	DF	F	Significativité	Taille d'effet
Charge de travail	1	.206	.653	.006
Nombre d'erreurs	1	1.819	.186	.048
Temps de réalisation	1	.946	.337	.026
Nombre de gestes	1	.461	.502	.013
Nombre d'exposition aux risques	1	10.822	.002	.231
Niveau auquel les gants sont mis	1	6.548	.015	.154

Le tableau (Cf. Annexe 8) indique qu'il n'y a pas d'effet de l'adaptation du cobot sur la charge de travail perçue, le nombre d'erreurs, le temps de réalisation, le nombre de gestes et l'acceptabilité.

Cependant, il existe un effet significatif du degré d'adaptation sur le nombre d'expositions aux risques (Cf. Figure 56). Les participants s'exposent à plus de risques lorsque le cobot ne prend pas prioritairement les pièces dangereuses pour l'humain ($M = 2,16$; $ET = 0,69$) que lorsqu'il s'y adapte ($M = 1,42$; $ET = 0,69$).

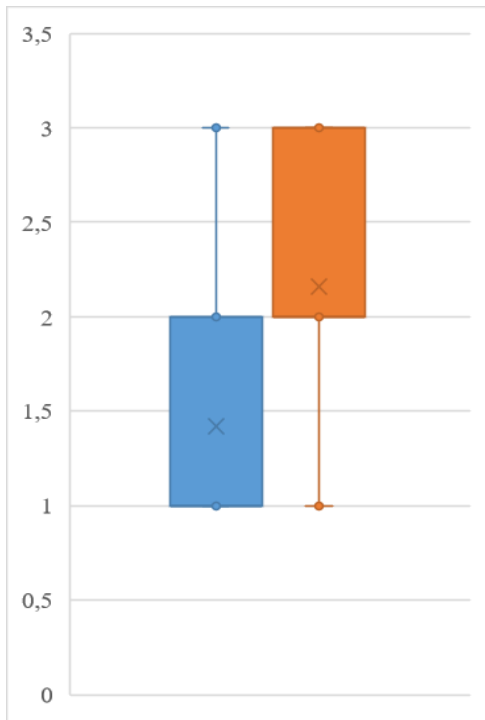


Figure 56. Diagramme en boîte de l'exposition aux risques quand le cobot s'adapte (bleu) et quand il ne s'adapte pas (orange)

Il y a également un effet significatif du degré d'adaptation sur le moment d'exposition aux risques (Cf. Figure 57). Les participants touchent les blocs rouges plus tard lorsque le cobot s'adapte à la dangerosité des pièces ($M = 3,42$; $ET = 1,64$) que lorsqu'il ne s'adapte pas ($M = 2,11$; $ET = 1,52$).

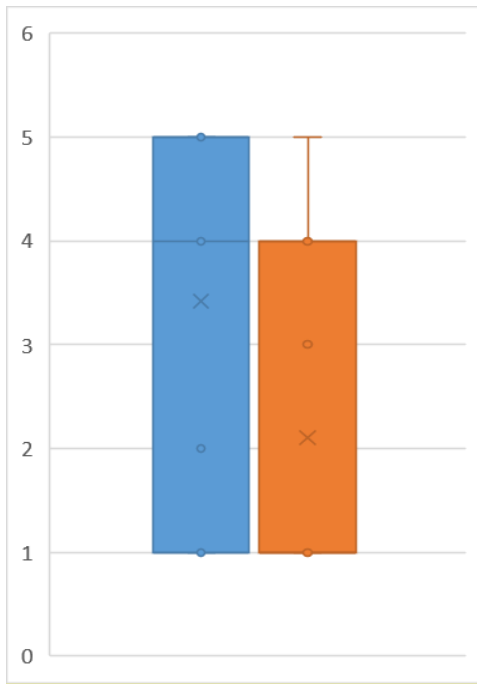


Figure 57. Diagramme en boîte du niveau d'exposition aux risques quand le cobot s'adapte (bleu) et quand il ne s'adapte pas (orange)

Les participants ont tous réussi la tâche. L'adaptation du cobot n'a pas eu d'effet sur la qualité de sortie du modèle à réaliser.

3. Synthèse du troisième TU

Dans cette recherche, nous étudions l'impact d'un cobot réel sur la performance (par exemple, le nombre d'erreurs, le temps de réalisation), la charge de travail, le risque pris et l'acceptabilité des participants réalisant une tâche d'assemblage de type industriel. Deux variables ont été testées : le niveau d'expertise humaine et le niveau d'adaptation du cobot aux contraintes de sécurité humaines. Les principaux résultats indiquent que les participants experts ont commis moins d'erreurs et pris moins de risques que les non-experts, mais qu'ils ont tous deux réussi la tâche grâce à l'adaptation du cobot. Le cobot a également été capable de s'adapter aux contraintes de sécurité humaines. Cette adaptation a conduit les participants à prendre moins de risques, ou à n'en prendre qu'en cas d'absolue nécessité pour mener à bien la tâche. En outre, contrairement aux résultats précédents, les experts ont obtenu un score d'acceptabilité de la collaboration cobotique similaire à celui des non-experts. Les concepteurs de systèmes cobotiques et de postes de travail pourraient bénéficier des résultats de cette recherche pour optimiser un poste de travail risqué et contraint.

ÉTUDES 3 ET 4 : TESTS DE L'ACCEPTABILITÉ COBOTIQUE DANS UNE SITUATION DE TRAVAIL COLLABORATIF

Chapitre 1. Méthode de mesure de l'acceptabilité cobotique

Pour la deuxième et la troisième étude (TUs), une version adaptée du questionnaire UTAUT2 (Martin, 2018) a été utilisée pour évaluer l'acceptabilité d'une collaboration avec un cobot (Cf. Tableau 23). Nous avons évalué les antécédents de l'intention comportementale, selon les modèles validés dans la littérature (Davis et al., 1989 ; Venkatesh et al., 2003 ; Venkatesh, 2021), afin d'identifier les tendances des participants à vouloir utiliser et accepter le cobot dans le cadre de la tâche proposée. L'UTAUT 2 évalue la facilité d'utilisation perçue (Davis et al., 1989 ; Venkatesh et al., 2003), le plaisir perçu (Venkatesh, 2012), l'utilité perçue (Davis et al., 1989 ; Venkatesh et al., 2003), l'influence sociale perçue (Venkatesh et al., 2003) et la confiance (Fogg et Tseng, 1999). On a demandé aux participants dans quelle mesure ils étaient d'accord avec la phrase proposée à l'aide d'une échelle de Likert allant de 1 (pas du tout d'accord) à 7 (tout à fait d'accord). La position de chaque item dans l'échelle a été rendue aléatoire pour limiter les effets d'ordre de présentation. Le terme « l'application » a été remplacé par le terme « un cobot » et le terme « utiliser » par le terme « collaborer » dans certaines questions dans un souci de contextualisation.

Pour mesurer l'utilité perçue et la perception de facilité d'usage, deux échelles à 4 items chacune, construites dans le cadre de l'étude de Martin (2018) ont été utilisées. Elles ont été élaborées à partir des items issus du questionnaire UTAUT (Venkatesh, 2012). L'influence sociale a été mesurée avec 3 items issus de la même étude (Martin, 2018) et adaptés de l'échelle de l'UTAUT (Venkatesh et al., 2003). Le plaisir perçu a été mesuré avec une échelle de 5 items issue de l'étude de Martin (2018) et inspiré de l'échelle de l'UTAUT2 (Venkatesh, 2021). La confiance perçue a été mesurée avec une échelle de 4 items construite par Martin (2018). Enfin, nous avons utilisé une échelle de cohérence de tâche afin de vérifier si le cobot était perçu comme cohérent pour la réalisation d'une tâche d'assemblage. Cette cohérence a été mesurée avec une échelle à 3 items issue de l'étude de Martin (2018).

Tableau 23. Le questionnaire d'acceptabilité utilisé dans l'étude

Dimensions	N° item	Items
Facilité d'utilisation perçue	1	Comprendre comment collaborer avec un cobot serait clair pour moi.
	2	Collaborer avec un cobot ne nécessiterait pas beaucoup d'effort mental.
	3	Je trouve que la collaboration avec un cobot serait facile.
	4	Je pourrais facilement réaliser la tâche comme je le veux grâce à un cobot.
Cohérence pour la tâche	5	La collaboration avec un cobot serait pertinente par rapport au contenu des tâches que j'ai réalisées.
	6	Pour les tâches à réaliser, la collaboration avec un cobot serait appropriée.
	7	La collaboration avec un cobot serait en adéquation avec les tâches que j'ai réalisées.
Plaisir perçu	8	Parce que l'utilisation d'un cobot semble très fun.
	9	Parce qu'utiliser un cobot pourrait m'amuser beaucoup.
	10	Parce que grâce au cobot, je pourrais satisfaire ma curiosité à découvrir de nouvelles choses.
	11	Parce que je pourrais avoir beaucoup de plaisir à interagir avec le cobot.
	12	Parce que le cobot pourrait me permettre d'apprendre/de faire des choses que je trouve très intéressantes.
Utilité perçue	13	La collaboration avec un cobot améliorerait mes performances dans la tâche.
	14	La collaboration avec un cobot pendant cette tâche augmenterait mes performances sans me fatiguer davantage.
	15	La collaboration avec un cobot améliorerait mon efficacité dans la tâche.
	16	Je trouve que la collaboration avec un cobot serait utile dans la tâche.
Influence sociale	17	Les personnes dont j'apprécie l'opinion pourraient m'inciter à utiliser le cobot pour réaliser la tâche.

	18	Les personnes de mon entourage que j'ai l'habitude d'écouter pourraient me conseiller d'utiliser le cobot pour réaliser la tâche.
	19	Les personnes de mon entourage qui comptent pour moi pourraient m'encourager à utiliser le cobot.
Confiance	20	Un cobot semble fournir des informations fiables.
	21	J'ai confiance dans les informations qu'un cobot pourrait fournir.
	22	Un cobot semble fiable.
	23	Je pense que l'on peut avoir confiance en un cobot.

Ce questionnaire a été administré durant le deuxième et le troisième TUs. Au total, 158 participants (120 issus du deuxième test et 38 issus du troisième) ont dû y répondre à la suite des tâches qui leur ont été demandées. Les passations du test ont duré environ 15 minutes par participant.

Chapitre 2. Résultats de l'étude de l'acceptabilité cobotique

2.1. Test de l'acceptabilité selon le type de collaboration et la main dominante (deuxième TU)

2.1.1. Validité du questionnaire d'acceptabilité

Pour le questionnaire sur l'acceptabilité, nous avons effectué une analyse en composantes principales (ACP) afin de tester la fiabilité de notre questionnaire et la validité des différentes échelles. Les alphas de Cronbach étaient tous supérieurs à 0,74 (Cf. Annexe 9). Une analyse factorielle a révélé que les facteurs combinés prédisaient 79% de la variabilité du score (Cf. Annexe 10). L'alpha de Cronbach du questionnaire est de 0,919.

2.1.2. Test de l'acceptabilité cobotique selon l'usage ou le non usage

Le tableau ci-dessous présente les résultats descriptifs du deuxième TU où le questionnaire a été rempli par des participants en condition contrôle et qui n'ont donc pas utilisé le cobot, et des participants dans la condition expérimentale qui venaient de collaborer avec le cobot. (Cf. Tableau 24 ; Figure 58).

Tableau 24. Résultats descriptifs du questionnaire d'acceptabilité du deuxième TU

	Facilité d'utilisation perçue		Cohérence perçue		Plaisir perçu		Utilité perçue		Influence sociale perçue		Confiance		Acceptabilité	
	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>
H/H	3.68	1.13	4.27	1.42	4.77	1.26	4.07	1.29	4.07	1.37	4.87	1.25	4.31	0.9
H/C	4.82	1.22	4.74	1.57	5.28	1.09	3.93	1.81	4.16	1.60	4.95	1.27	4.69	1.1

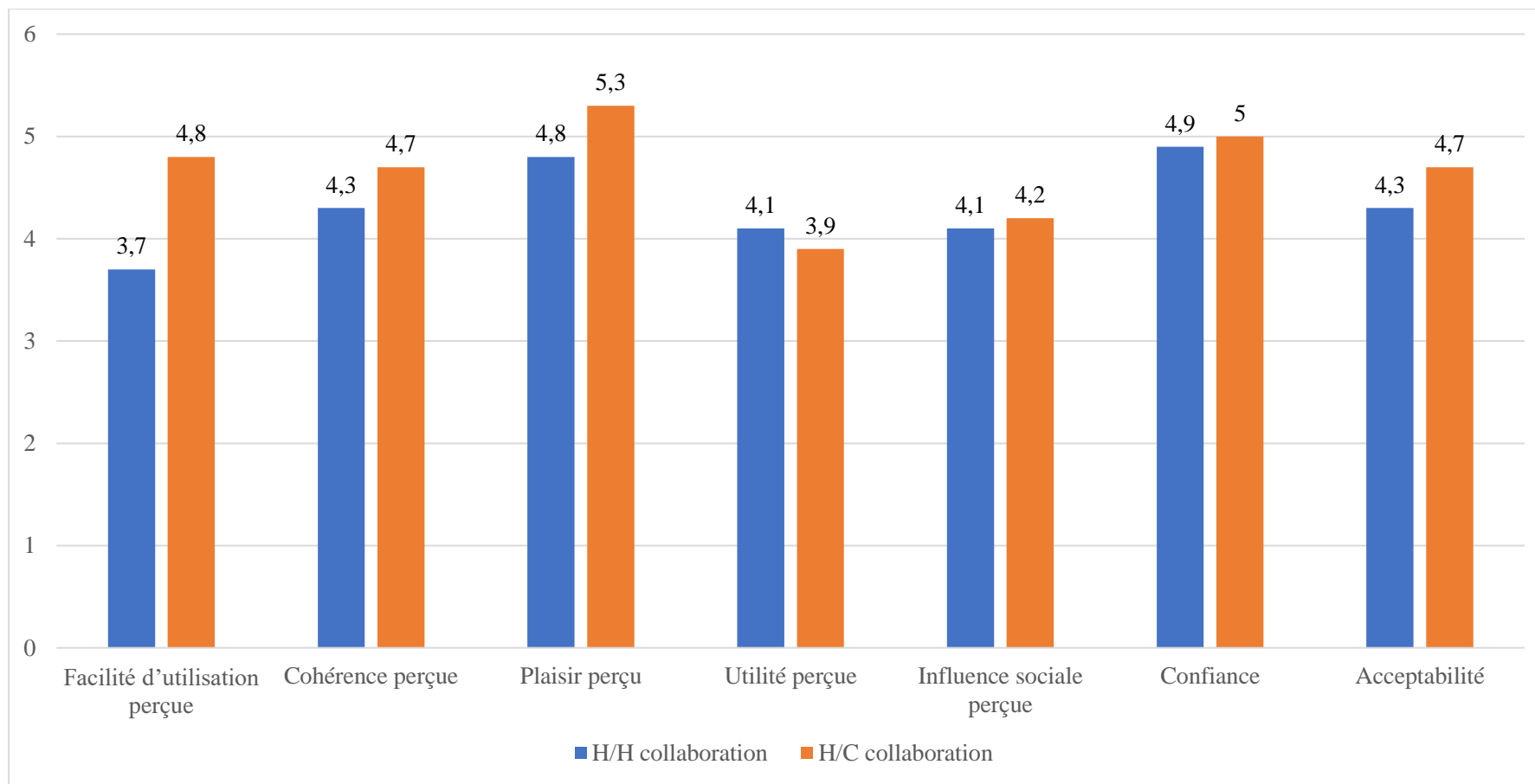


Figure 58. Diagramme à barres des sous-dimensions de l'échelle d'acceptabilité

Travailler avec un cobot a un effet positif sur la facilité d'utilisation perçue et sur le plaisir perçu (Cf. Tableau 25 ; Cf. Annexe 11).

Tableau 25. Résultats de la multi-analyse de variance du type de collaboration sur les différentes échelles du questionnaire d'acceptabilité (en gras les effets significatifs)

Variable indépendante	Variable dépendante	<i>DF</i>	Carré moyen	<i>F</i>	<i>Sig.</i>	Eta-carré partiel
Type de collaboration	Facilité d'utilisation	1	38.265	27.680	<.001	.193
	Cohérence	1	6.484	2.914	.091	.025
	Plaisir	1	7.572	5.427	0.022	.045
	Utilité	1	.576	.235	.629	.002
	Influence sociale	1	.251	.114	.737	.001
	Confiance	1	.183	.115	.735	.001
	Acceptabilité	1	3.772	3.812	.053	.032

2.2. Test de l'acceptabilité cobotique selon l'expertise de la tâche et l'adaptation cobotique (troisième TU)

2.2.1. Validité du questionnaire d'acceptabilité

Un test a également été effectué pour évaluer la fiabilité du questionnaire d'acceptabilité : le résultat était satisfaisant avec un Cronbach supérieur à 0,9. Toutes les échelles testées séparément ont un score de Cronbach supérieur à 0,78. Une analyse factorielle a été effectuée pour s'assurer que les échelles utilisées mesuraient des facteurs indépendants. Le test a identifié 6 facteurs différents qui prédisaient plus de 84 % de la variabilité des scores. Ces 6 facteurs sont ceux que nous avons prédits. Aucun item n'a donc été retiré.

2.2.2. Test de l'acceptabilité cobotique selon l'expertise de la tâche et l'adaptation cobotique (troisième TU)

Les réponses aux échelles du questionnaire d'acceptabilité ont été comparé entre la condition contrôle (participants non experts) et la condition expérimentale participants experts). Le tableau suivant présente les résultats descriptifs (Cf. Tableau 26).

Tableau 26. Résultats descriptifs de l'effet de l'expertise sur les différentes dimensions

Condition	Facilité d'utilisation		Cohérence		Plaisir		Utilité		Influence		Confiance		Accept	
	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>
Expert	21.95	3.82	16.84	3.69	27.42	6.27	17	5.99	13.74	4.16	20.16	4.6	19.52	2.56
Non-expert	21.21	4.6	16.26	4.09	27.8	8.08	17.95	6.39	13.21	4.55	21.68	5.37	19.55	3.97

Une MANOVA a été réalisée afin de tester si le niveau d'expertise du participant a un effet sur l'acceptabilité de celui (cf. Tableau 27).

Tableau 27. Effet de l'expertise du participant sur les scores d'acceptabilité

Variables dépendantes	<i>DF</i>	<i>F</i>	Significativité	Taille d'effet
Acceptabilité	1	.001	.974	.000

Les tests révèlent qu'il n'y a pas d'effet de l'expertise sur l'acceptabilité.

2.2.3. Test de l'acceptabilité cobotique selon l'expertise de la tâche et l'adaptation cobotique (troisième TU)

Les réponses aux échelles du questionnaire d'acceptabilité ont été comparé entre la condition contrôle (pas d'adaptation du cobot aux contraintes sécuritaires) et la condition expérimentale (adaptation du cobot aux contraintes sécuritaire). Le tableau suivant présente les résultats descriptifs (Cf. Tableau 28).

Tableau 28. Résultats descriptifs de l'effet de l'adaptation cobotique sur les différentes échelles du questionnaire d'acceptabilité

Condition	Facilité d'utilisation		Cohérence		Plaisir		Utilité		Influence		Confiance	
	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>
Adaptation	21.21	4.48	16.63	4.27	26.37	8.11	17.74	5.14	13.05	4.7	21.26	5.37
Pas adaptation	21.95	3.96	16.47	3.5	28.05	6.11	17.21	7.11	13.89	4	20.58	4.69

Une MANOVA a été réalisée pour mesurer l'effet de l'adaptation du cobot sur les scores d'acceptabilité (Cf. Tableau 29).

Tableau 29. Résultat de la MANOVA comparant les scores d'acceptabilité selon le niveau d'adaptation du cobot

Variabiles dépendante	DF	F	Significativité	Taille d'effet
Acceptabilité	1	.085	.772	.002

Les tests révèlent qu'il n'y a pas d'effet de l'adaptation du cobot sur l'acceptabilité de la collaboration cobotique.

3. Synthèse des résultats sur l'acceptabilité

Dans notre deuxième TUs, les résultats ont révélé qu'avoir travaillé avec un cobot impacte positivement l'acceptabilité de la collaboration cobotique en termes de plaisir perçu et de facilité d'utilisation perçue. Toutes les dimensions de l'acceptabilité étaient hautes dans les deux conditions, particulièrement le plaisir perçu et la confiance dans la collaboration cobotique. Dans notre troisième TUs, l'acceptabilité perçue n'a pas significativement changé selon les différentes conditions expérimentales. En effet, les scores d'acceptabilité perçue variaient de moyens à hauts peu importe la condition expérimentale.

ÉTUDES 2, 3 ET 4 : PROFIL DES UTILISATEURS

Cette partie de résultats vient compléter les hypothèses précédemment citées sur l'acceptabilité. En effet, nous ne relevons que peu d'effets de l'adaptation du cobot sur l'acceptabilité, il convient alors d'analyser plus finement les comportements des utilisateurs face à la technologie. C'est une tentative de prendre en compte une expérience utilisateur plus globale, sans utiliser de mesure auto-rapportée. Il nous a paru pertinent de présenter certaines observations intéressantes issues des TUs. En effet, nous avons, à plusieurs reprises, été surpris par des comportements de participants que nous n'avions pas anticipés. Ces comportements pourraient inspirer de futures recherches. Nous choisissons donc de les exposer, afin que ces données puissent être utiles dans la construction de futurs paradigmes expérimentaux.

1. « Faire contre » ou « faire avec »

Lors de notre premier TUs, nous avons remarqué des stratégies de résolution de tâche que nous n'avions pas prévues dans le cadre de l'expérience. Dans l'une des conditions de ce test, les participants devaient réaliser la tâche expérimentale le plus rapidement possible en collaboration avec un cobot. Ils possédaient toutes les pièces nécessaires pour réaliser l'assemblage seuls mais ils devaient le faire avec le cobot. Face à cette situation, les participants avaient différentes stratégies : être le plus collaboratif possible, ou saboter le cobot pour faire la tâche seul. En effet, certains opérateurs ont remarqué que le cobot pouvait être bloqué (c'est-à-dire ne plus pouvoir bouger) lorsque l'opérateur faisait certains mouvements (e.g. toucher le cobot, déplacer la pièce que le cobot s'apprête à prendre au dernier moment). Les participants qui voulaient finir le plus vite au détriment de la collaboration faisaient exprès de bloquer le cobot (nous l'avons remarqué et ils nous l'ont dit à la fin de la tâche) pour finir rapidement la tâche seuls pendant le déblocage du cobot (intervention manuelle de l'informaticien). Nous pourrions nommer cette stratégie « faire contre » (Folcher & Rabardel, 2004).

Contrairement à ce type de participants, d'autres essayaient de répartir les tâches avec le cobot au maximum. Ils prenaient leur temps pour maximiser le nombre de pièces mises par le cobot (nous ne l'avons pas remarqué mais ils nous l'ont dit à la suite de la tâche). Les opérateurs ont instrumentalisé différemment le cobot pour réussir la tâche, ils ont « fait avec » (Folcher & Rabardel, 2004). Il pourrait être intéressant d'étudier ces différents profils car il est possible qu'ils apparaissent aussi en contexte industriel. Cela nous montre l'importance de TUs, nous ne pouvons pas prévoir tous les usages de la technologie avant de la confronter à des opérateurs.

2. Anthropomorphisme et confiance dans l'autorité cobotique

Lors de nos différents TUs, nous avons remarqué que certains opérateurs « anthropomorphisaient » le cobot. Ils utilisaient des termes habituellement réservés aux humains, par exemple : « *il est mignon* » (verbatim d'un opérateur). De même, ils semblaient inférer des états mentaux au cobot, notamment ils étaient désolés de l'avoir bloqué (sans le faire exprès) : « *mince, je l'ai bloqué, le pauvre, c'est ma faute* » (verbatim d'un opérateur). Ici, l'utilisation d'un mot comme « *le pauvre* » suggère que la personne infère que le cobot subit cette situation. Dans cette exemple, l'anthropomorphisation est assez élevée. Plus régulièrement, les participants s'adressaient au cobot comme s'ils s'adressaient à un collègue : « *ah tu vas là ! Bon bah je vais aller là alors* », « *bon, tu y vas là ?!* », « *il est fatigué aujourd'hui lui dis-donc* ». Il pourrait être intéressant de classer des profils d'utilisateurs selon leur propension à anthropomorphiser les cobots. En fonction de cette propension, les résultats d'une collaboration pourraient différer.

Nous avons pu remarquer lors des différents TUs une confiance élevée de la part des opérateurs concernant les capacités du cobot. En effet, les participants semblaient partir du principe que le cobot ne pouvait pas se tromper et ceci avant même que nous leur expliquions le fonctionnement de la collaboration : « *il a forcément raison de toute façon, non ?* » (verbatim d'un opérateur). Il est arrivé (très rarement) que le cobot se trompe du fait d'un défaut de perception de la situation de travail. Dans ces cas-là, les participants doutaient mais finissaient par écouter les conseils du cobot. Nous avons appelé ceci de la « soumission à l'autorité cobotique » sans approfondir ce point car cela ne faisait pas partie de nos hypothèses. Cela est particulièrement apparu lors de notre deuxième TUs où nous comparions la collaboration humain/humain et humain/cobot. En effet, lorsque les collaborateurs humains montraient une pièce mal placée par l'opérateur, beaucoup d'opérateurs doutaient, argumentaient et parfois ne rectifiaient pas leur faute car ils étaient sûrs de leur choix. En revanche, quand c'était le cobot qui désignait une erreur de l'opérateur, celui-ci prenait un temps de vérification, puis corrigeait sa faute. Après une première correction de faute avec le cobot, les opérateurs ne semblaient plus prendre le temps de la vérification et corrigeaient directement leur faute. Leur confiance envers le cobot semblait être établie et robuste. Il pourrait être intéressant d'étudier ce concept car cela pourrait avoir des conséquences en situation de travail.

3. Évolution de la collaboration au cours de l'usage

Il semble que l'activité de collaboration humain/cobot soit possible (et même efficace) mais le rapport qu'a l'humain à son activité et au cobot semble évoluer dans le temps. En effet, lorsque le participant découvre le cobot, celui-ci travaille tour à tour avec lui, c'est-à-dire qu'il attend que le cobot pose une pièce avant d'en poser une lui-même. Dans ce cas, il s'agit plutôt d'une activité mutualisée (Bobillier Chaumon, 2017), c'est-à-dire que l'humain et le cobot travaillent sur une même tâche mais sans collaborer réellement. En revanche, après quelques secondes (voire minutes) d'activité avec le cobot, l'humain se met à travailler en même temps que le cobot, il s'approprie les capacités du cobot et les utilise pour performer du mieux possible. L'activité mutualisée s'est transformée en activité médiatisée (Bobillier Chaumon, 2017 ; Folcher & Rabardel, 2004).

Discussion

1. Identification des variabilités et de leurs impacts sur l'opérateur et la performance

Cette partie vise à déterminer si l'hypothèse 1 est confirmée, infirmée ou si l'on ne peut pas conclure sur celle-ci. Elle se décompose en deux temps. Dans un premier temps, nous discuterons des résultats concernant la présence de variabilités sur le terrain d'étude. Dans un second temps, nous discuterons de leur impact sur les opérateurs et leur performance.

1.1. Le repérage de variabilités en situation de travail

L'observation et les entretiens, ainsi que la classification des variabilités, nous ont permis d'identifier de nombreuses variabilités de différents types. Nous avons ainsi des variabilités techniques (9 au total) et quelques variabilités organisationnelles (5), intra individuelles (4) et inter individuelle (5).

Ces variabilités amènent l'activité à se modifier. Nous allons discuter ces modifications en utilisant un exemple différent par grande catégorie de variabilités.

Concernant les variabilités techniques, il y a plusieurs variabilités qui ont des impacts, nous ne nous attarderons que sur une seule. Les mélanges travaillés en BAG diffèrent en texture, en état et en dangerosité. En effet, l'état du mélange utilisé change drastiquement la manière dont l'opérateur va devoir nettoyer sa surface expérimentale. Si le mélange est liquide, il devra nettoyer celui-ci avec ses propres mains ou avec une brosse. L'opérateur peut choisir de gagner du temps et de le faire à la main, ce qui l'exposera à plus de risques de contamination. Si le mélange est solide (sous forme de poudre), l'opérateur n'a pas d'autres choix que d'utiliser un engin aspirant ou collant pour récolter la poudre, il diminue son exposition aux risques mais le nettoyage peut être plus long et donc plus contraignant. La variabilité de l'état du mélange influe donc directement sur la manière qu'aura l'opérateur de réaliser sa tâche et sur les conséquences qui en découlent, en termes de santé et de temps de réalisation de la tâche. Ce type de variabilité a été testé lors du troisième TU qui a démontré que le cobot pouvait prendre en charge la variabilité de l'équipement utilisé (type de gants) afin de préserver les ressources de l'humain. Les variabilités techniques sont inhérentes au travail, elles sont présentes en toute situation. Il se peut que la prise en charge de ces variabilités doive être déléguée à une assistance cobotique, mais elle peut aussi être prise en compte en amont, dans l'organisation du travail. La solution cobotique ne peut pas être la solution à tous les "désordres du travail" et ceci d'autant plus que les cobots ne sont pas encore en capacité technique de manipuler des mélanges

collants, visqueux, etc. Cependant, c'est précisément en aidant l'opérateur à faire face à ce type de variabilité que la collaboration pourra avoir une bonne évaluation de la dimension individuelle de l'acceptation située (Bobillier Chaumon, 2016).

Concernant les variabilités organisationnelles, nous pouvons évoquer la coactivité en BAG. En effet, pendant leur activité en BAG, il arrive que les opérateurs partagent la BAG avec un collègue travaillant sur un autre projet. Parfois, ils travaillent en même temps sans avoir le droit de connaître les détails de la manipulation l'un de l'autre (secret industriel). Contrairement au travail seul, ils doivent faire attention aux mouvements de leur collègue car ceux-ci les font bouger à cause de la pressurisation dans la BAG. Un mouvement brusque du collègue, peut donc perturber, voire faire échouer, une manipulation nécessitant des mouvements fins et précis. La variabilité organisationnelle de coactivité (présence ou non) a un impact direct sur l'activité et la performance de l'opérateur. Dans une revue de littérature sur l'impact des robots sociaux sur les groupes sociaux (Leite et al., 2013), les auteurs ont mis en avant que les robots ont les capacités d'améliorer les relations interpersonnelles dans le cadre de la santé et de l'éducation. Il est donc possible qu'un cobot puisse aider à la gestion de cette variabilité afin de renforcer le collectif de travail (en évitant les conséquences désagréables de la coactivité) et d'éviter les risques. Cette gestion garantirait une bonne évaluation de la dimension relationnelle du modèle de l'acceptation située (Bobillier Chaumon, 2016). Cependant, ce type de variabilité pourrait tout aussi bien être gérée au sein d'un collectif de travail sans implémentation cobotique. Une mise en lumière des difficultés en groupe de travail avec une réflexion sur les changements à effectuer pour faire face à celles-ci doit être la priorité pour envisager un changement bénéfique.

Concernant les variabilités intra-individuelles, nous avons pu observer que l'expérience sur la tâche a un impact sur la réalisation de celle-ci. En effet, les experts développent des astuces pour passer moins de temps sur le nettoyage de la manipulation (e.g. ils laissent tourner le rotor sali dans un récipient de solvant pour décoller le mélange pendant qu'ils partent faire une autre partie de la manipulation expérimentale), ce qui augmente leur efficacité et diminue leur exposition aux risques. Ce n'est pas le cas des novices qui nettoient tout le matériel une fois la manipulation terminée. La variabilité intra-individuelle de l'expérience a donc un effet direct sur la façon de réaliser la tâche. Cette variabilité pourrait être gérée par une collaboration cobotique. Cela a été réalisé dans le cadre d'une expérimentation reproduisant une collaboration humain/cobot (Peternel et al., 2018). Dans cette expérience, le cobot s'est adapté au niveau de fatigue de l'humain pour adapter son propre effort afin de préserver les ressources de l'humain tout en réalisant la tâche. La variabilité de la charge de travail a également été testé dans nos

TUs et les résultats étaient positifs. La gestion de cette variabilité pourrait permettre aux opérateurs de maintenir une charge de travail moyenne à basse et, par cela, permettre une bonne évaluation de la dimension individuelle du modèle de l'acceptation située (Bobillier Chaumon, 2016).

Concernant les variabilités inter-individuelles, la taille des opérateurs a un impact sur leur manière de réaliser leur activité. En effet, les opérateurs de petite taille vont avoir beaucoup de difficultés à attraper des produits en hauteur sur les étagères des BAG (c'est parfois impossible et ils doivent demander de l'aide à un collègue plus grand) et mettront plus de temps à déplacer des objets dans la BAG. Les opérateurs de grande taille ont des difficultés à attraper les objets qui se trouvent proche de la vitre (cela les force à se tordre les poignets) et ils doivent écarter les jambes pour être alignés aux trous des gants de la BAG. Cela leur provoque des tensions (parfois des douleurs) au dos et à la nuque. Une collaboration cobotique pourrait aider à la gestion de cette variabilité. En effet, cela redonnerait de l'autonomie aux opérateurs, ce qui garantirait une bonne évaluation de la dimension organisationnelle du modèle de l'acceptation située (Bobillier Chaumon, 2016). Mais c'est également toute la BAG qu'il faudrait aménager pour favoriser la conception d'une situation de travail adaptée à tous. D'autres variabilités inter-individuelles, notamment de stratégies gestuelles pendant une tâche collaborative, ont des impacts sur la performance à la tâche et sur le confort (Benhabib et al., 2021). Les auteurs concluent également qu'un cobot adapté à ce type de variabilité aurait pu avoir un effet bénéfique sur la tâche.

1.2. Effets des variabilités sur la santé et la performance

Ces variabilités ont, pour la plupart, des effets que nous avons pu voir directement sur le terrain d'étude. En revanche, la valence de ces effets sur les opérateurs et leurs tâches est difficilement quantifiable. Les impacts du travail sur la santé sont sujets à la variabilité inter-individuelle. Ceci a déjà été démontré sur l'apparition de TMS (Bourgeois & Hubault, 2005) par exemple. En effet, une variabilité peut être vécue comme pénible par un opérateur et comme contribuant au sens du travail pour un autre (Landry & Caroly, à paraître). C'est aussi les résultats qu'ont obtenus Cippelletti et al. (2023). En effet, dans leur étude, les opérateurs percevaient différemment certains facteurs de risques de Troubles Musculosquelettiques (TMS). Certains opérateurs appréciaient particulièrement le port de charges lourdes, bien que facteur de risque des TMS, parce qu'il faisait sens pour leur activité alors que d'autres tenaient à être soulagés de ce type de port, estimant que leur métier consistait principalement dans le

contrôle visuel de défauts. Nos résultats posent la même question : comment décider d'une répartition des tâches entre l'humain et le cobot qui vise à soulager l'opérateur et à préserver les tâches que les opérateurs jugent comme essentielles à son activité ? La cobotique pourrait être solution. Un cobot pourrait s'adapter aux préférences de l'opérateur en s'adaptant aux caractéristiques individuelles et en s'adaptant par la gestion des variabilités.

Au vu de ces résultats, nous concluons que la situation de travail contient réellement des variabilités et que celles-ci ont un impact réel sur l'opérateur et/ou sur son activité et les résultats de son activité (performance). La première hypothèse est donc validée. La prochaine partie tente de répondre à la deuxième hypothèse.

2. Prise en charge des variabilités par l'assistance cobotique et effets sur la performance et la santé

A travers nos expériences, nous avons testé les différentes capacités des cobots et les bénéfices qu'ils pourraient apporter dans une collaboration humain/robot au travail. Nos expériences ont montré qu'ils étaient capables de s'adapter à l'humain dans le cadre d'une tâche d'assemblage (notamment dans la première étude). Nous avons pu tester différentes variabilités : **intra individuelles** (e.g. variabilité de charge de travail), **inter individuelles** (e.g. variabilité d'expérience sur la tâche, organisation dans la tâche, taille, âge, genre, main dominante), **organisationnelles** (e.g. variabilité de complexité de tâche dans la seconde étude expérimentale) et **techniques** (e.g. variabilité de dangerosité de la pièce à manipuler dans la troisième étude expérimentale). Nous avons tenté d'implémenter une gestion de ces variabilités dès la programmation du raisonnement du cobot afin qu'il s'adapte durant la tâche collaborative.

2.1. Effets de l'assistance cobotique sur la performance et la santé

Les résultats de notre premier TU montrent que la collaboration humain/cobot a permis de réduire le nombre d'erreurs et le nombre de gestes effectués. Ce résultat pourrait impliquer que dans une tâche industrielle non expérimentale, la collaboration avec un cobot pourrait améliorer l'efficacité de l'opérateur et la qualité de son travail. Des résultats similaires ont été rapportés précédemment. En effet, Salunkhe et al. (2019) ont récemment constaté que les cobots pouvaient, en théorie, identifier les gestes problématiques, protégeant ainsi les travailleurs humains, tout en améliorant la qualité du travail.

Étant donné que l'introduction du cobot a augmenté le nombre d'instructions (les participants devaient comprendre la tâche et comprendre comment le cobot fonctionne et comment interagir avec lui), nous craignons que ces instructions supplémentaires aient un impact négatif sur la charge de travail perçue. Cependant, cela n'a pas été le cas, puisque les charges de travail perçues n'ont pas différé dans les deux conditions (humain seul VS humain/cobot), bien que la collaboration avec le cobot n'ait pas eu d'effet négatif sur la charge de travail perçue. Kildal et al. (2019) ont constaté que la complexité de la tâche n'est pas augmentée du fait de l'introduction d'une collaboration entre l'humain et le cobot.

À noter que la méthode de programmation du robot par planificateur de trajectoire permet une adaptation à plusieurs variabilités inter-individuelles. Le premier test utilisateur a montré que sans avoir programmé le cobot pour la prise en compte de variables précises, le planificateur qui calcule une trajectoire en temps réel, permet de s'adapter à différents participants sans les contraindre dans un ordre d'assemblage, sans leur demander d'exécuter des gestes dans un ordre précis, et fournit en temps réel des messages guidant l'opérateur tout au long de l'assemblage. Ainsi, la méthode de planification du cobot par PDDL (*Planning Domain Description Language*) a de bonnes qualités intrinsèques pour prendre en compte les variabilités inter-individuelles telles que les modes de raisonnements et de planification/organisation des actions de l'humain qui peuvent différer d'un individu à l'autre (par exemple : assembler à l'horizontal vs vertical/par couleur ou toute couleur indépendamment), la taille (qui n'a pas été contrôlée), le genre (qui n'a pas été contrôlé), la formation initiale etc...

2.2. Effets de l'adaptation de l'assistance cobotique aux variabilités

Les résultats de notre deuxième TUs ont mis en évidence que la variabilité de la charge de travail (**intra individuelle**) et la variabilité de complexité de la tâche (**organisationnelle**) ont des effets sur la performance de l'opérateur. En effet, on remarque un taux d'échec plus élevé (plus de 45% d'échec) quand la tâche est complexe et quand la charge mentale est haute chez les opérateurs qui travaillent avec un autre opérateur. En revanche, lorsque l'opérateur travaille avec le cobot, on remarque que la collaboration « lisse » les effets de ces deux types de variabilités. En effet, le taux de succès, que la tâche soit complexe ou simple, que la charge de travail soit haute ou basse, reste le même : 98% de succès dans tous les cas. D'autres chercheurs ont trouvé des résultats similaires, la collaboration cobotique améliore la qualité de sortie (Salunkhe et al., 2019) et diminue les mauvaises postures (Chen et al., 2022) quand celui-ci

s'adapte au travail de l'humain. Également, quand le cobot ne s'adapte pas à la méthode de travail de l'humain, on observe des résultats inverses. En effet, un cobot pourrait dégrader la qualité de la pièce de sortie en ne prenant pas en compte les variabilités de la situation de travail (Schoose, 2022).

Les résultats de notre troisième TU ont permis d'étudier les effets de la collaboration humain/cobot quand la variabilité d'expérience sur la tâche (**inter individuelle**) est prise en compte au sein de la tâche. On remarque que le cobot est capable de s'adapter à un expert (ex : adaptation de vitesse, adaptation à la stratégie de l'opérateur, etc.), autant qu'à un novice (ex : donne des informations dès que l'opérateur en demande, identifie les erreurs en temps réel, etc.). Dans notre expérience, cette adaptation a eu un effet intéressant. En effet, la variabilité de l'expérience était lissée par le cobot, que l'opérateur soit expert ou novice, la réussite de la tâche était garantie par la collaboration. En revanche, les novices faisaient plus d'erreurs, mais celles-ci étaient rattrapées par le cobot et l'humain. Sans collaboration cobotique, la variabilité de l'expérience peut avoir des effets sur la tâche et la manière de la réaliser (Cippelletti, 2017). Or, ce n'est pas le cas quand le cobot a été programmé pour s'adapter à la variabilité inter individuelle dès sa conception.

Il y a donc eu un lissage des compétences des participants lorsqu'ils étaient en collaboration. Cela pose question pour l'implémentation en industrie : quel intérêt a l'expérience lorsque celle-ci est lissée par l'usage de la technologie ? Ce lissage ne risque-t-il pas de faire disparaître certaines compétences issues de l'expérience des opérateurs ? Il faut s'interroger sur les compétences que l'on veut maintenir dans la situation de travail et adapter le cobot pour que celles-ci soient préservées. Si un novice peut s'appuyer sur le cobot pour effectuer la tâche aussi bien qu'un expert, qui a la responsabilité en cas d'accident ? L'expert aura peut-être plus d'expérience pour repérer la présence d'un risque d'accident, ce n'est pas le cas du novice. La responsabilité reviendra-t-elle au cobot ? Ou le novice devra-t-il la porter seul ? Il convient d'approfondir ces questions de façon située avant l'implémentation d'un cobot sur une activité industrielle.

Les résultats issus de ce TU ont permis d'identifier l'impact de la collaboration cobotique en présence d'une variabilité technique : la dangerosité des pièces à assembler. Dans cette dernière étude, nous avons décidé de tester la présence et l'absence de prise en compte de cette variabilité par le cobot. Celle-ci a eu un effet très intéressant : les opérateurs s'exposent moins aux risques quand le cobot s'adapte à leur contrainte sécuritaire. Et lorsqu'ils s'y exposent, ils le font en dernier recours, plus tard que dans la condition où le cobot ne s'adapte pas à cette variabilité. A notre connaissance, il n'y a pas d'étude expérimentale ayant fait des tests

similaires. En revanche, on peut noter que certains auteurs ont mis en avant que les cobots permettent de réduire d'autres risques pour la santé des opérateurs, notamment le risque de développer des TMS (Salunkhe et al., 2019).

Grâce à nos résultats expérimentaux, nous pouvons affirmer que dans le cadre d'une tâche d'assemblage, la prise en charge des variabilités de la situation par le cobot (et ceci dès sa conception) a eu des effets positifs sur l'opérateur (moins d'exposition aux risques) et sur sa performance (meilleur taux de réussite de la tâche). L'hypothèse 2 est donc validée.

Cependant, notre travail soulève des questions sur l'intérêt des cobots en industrie. En effet, à travers les TUs, nous remarquons une plus grande lenteur de la collaboration cobotique comparativement à une collaboration humaine ou à une absence de collaboration. Quels effets cette lenteur pourrait avoir sur une activité industrielle à long terme et sur l'opérateur qui l'effectue ? Les débats avec d'autres chercheurs dans ce champ d'étude semblent identifier deux solutions possibles : 1. Cette lenteur imposée à l'humain va préserver ses ressources et lui permettre d'effectuer un travail de meilleure qualité ; ou 2. Cette lenteur va progressivement frustrer l'opérateur s'il se rend compte qu'il peut aller plus vite seul mais qu'on le limite dans ces possibilités.

Dans la prochaine partie, nous discutons de notre dernière hypothèse et de l'éclairage que nos résultats lui apportent.

3. L'acceptabilité de la cobotique

A la fin de nos deux derniers tests utilisateurs, nous avons étudié l'acceptabilité de la collaboration cobotique.

Les résultats du deuxième test ont montré une bonne acceptabilité de la collaboration humain/cobot au travail parmi les participants. En effet, les participants semblent accepter cette collaboration qu'ils aient déjà collaboré avec le cobot (acceptabilité/acceptation) ou pas (acceptabilité *a priori*). De plus, on remarque une haute confiance dans les informations données par le cobot et un haut plaisir perçu à travailler avec un cobot dans les deux conditions (avant et après collaboration). Les résultats montrent également une différence significative entre les participants qui ont travaillé avec le cobot et ceux qui ne l'ont pas fait : le plaisir perçu et la perception de la facilité d'usage sont plus élevés après une première collaboration. Ces résultats sont innovants car, à notre connaissance, ce type de mesure n'a jamais été réalisé sur une collaboration cobotique. En revanche, des études similaires ont été réalisées dans le cadre d'un travail doctoral (Martin, 2018). Ce travail conclut de façon similaire que les réponses aux

échelles d'acceptabilité ne sont pas exactement les mêmes selon que le participant y réponde avant l'interaction avec la technologie ou après. En effet, dans ses études, l'auteur note que l'utilité perçue et l'utilisabilité perçue sont des indicateurs stables de l'intention d'usage. Cependant, lorsque le participant répond aux échelles après avoir utilisé la technologie, l'influence sociale et les émotions négatives deviennent des prédicteurs de l'intention d'usage. Ces résultats n'ont pas été obtenus par comparaison entre un avant et un après, il n'est donc pas possible de directement comparer nos résultats avec ceux de l'auteur.

Les résultats de notre troisième test ont permis d'étudier l'acceptabilité de la collaboration cobotique quand le travail est contraint et risqué. Il n'y a pas de différence dans les scores d'acceptabilité que le cobot s'adapte ou pas aux contraintes sécuritaires du participant. Dans les deux conditions, les participants ont une haute acceptabilité de la collaboration. Il est possible que ces résultats proviennent d'un biais issu de la passation expérimentale. Le risque n'était pas réel, pour des raisons éthiques. Il est donc possible que les participants n'aient pas perçu de risques réels mais seulement une légère contrainte, ils n'auraient donc pas plus accepté un cobot qui les soulage de leurs contraintes, qu'un cobot qui ne le fait pas. Ces résultats sont innovants car, à notre connaissance, ce type de mesure n'a jamais été réalisé sur une collaboration cobotique.

Afin de généraliser les résultats obtenus dans ces tests utilisateurs, nous avons réalisé une étude de l'acceptabilité cobotique auprès d'un échantillon de plus de 300 salariés français, des résultats similaires et différents ont été obtenus (Cippelletti et al., en édition). La plupart des participants n'avaient jamais collaboré avec un cobot. Après une définition et des exemples illustrant une collaboration humain/cobot en situation de travail, les participants devaient répondre à différentes échelles mesurant l'acceptabilité de ce type de collaboration. Les résultats montrent que l'utilité perçue, le plaisir perçu et l'auto-efficacité perçue face à la collaboration sont particulièrement élevés. L'étude a également permis d'identifier les dimensions influençant l'intention d'utiliser des cobots. Il semble que la facilité d'utilisation perçue, l'utilité perçue et la perception de la sécurité au sein de ce type de collaboration influencent grandement l'intention d'utiliser un cobot dans son travail.

Au vu de nos résultats, l'hypothèse semble être validée, car nous ne notons pas de diminution de l'acceptabilité après usage, et de plus, certaines dimensions de l'acceptabilité augmentent après celui-ci. Cependant, davantage d'études sont nécessaires pour conclure à la validation de cette hypothèse.

4. Discussion générale

Les résultats de nos études nous amènent à considérer l'importance d'un processus de conception itératif. En effet, nos observations ont révélé une utilisation, voire une appropriation parfois inattendue des cobots. Cela montre l'importance d'analyser l'activité et de réaliser des TUs avant, pendant et après l'implémentation d'un dispositif cobotique sur un poste de travail. En effet, la conception ne s'arrête jamais vraiment, même après une implémentation, la technologie peut toujours être améliorée grâce aux retours des opérateurs.

4.1. Le potentiel capacitant du cobot

A travers nos différentes études, il semble que l'utilisation d'un cobot puisse être capacitant pour l'opérateur humain. En effet, nous remarquons qu'en analysant les dimensions issues de l'ECS (Compan, 2022), la collaboration cobotique, lorsqu'elle est programmée pour tenir compte des variabilités (comme c'est le cas dans nos études), remplit de nombreux critères. Nous allons dimensions par dimensions, identifier les critères qui sont remplis par notre application de la collaboration cobotique.

Premièrement, parmi les dimensions « cognitives et sociales », notre utilisation des cobots adaptés aux variabilités humaines remplit tous les critères de l'ECS. En effet, nous avons investigué les conditions d'acceptation de la technologie (critère d'acceptabilité sociale) et mesuré l'utilité perçue des utilisateurs (critère de l'utilité théorique). Également, nous avons évalué l'utilisabilité in situ (critère de l'utilisabilité) et la charge de travail (critère de charge de travail). Et enfin, nous avons veillé à ce que le cobot communique de façon transparente (critère de transparence opérative) et qu'il s'adapte aux stratégies humaines (critère de réflexivité individuelle et prescription des tâches).

Deuxièmement, parmi les dimensions « sécurité et intégrité des personnes », nos études remplissent tous les critères sauf un. En effet, nous avons identifié les risques sur le terrain (critère de la sécurité) et les variabilités présentes (critère des variabilités). Cependant, la technologie n'étant pas encore suffisamment mature, nous n'avons pas pris en compte les normes réglementaires en vigueur (critère des normes).

Troisièmement, parmi les dimensions « expérientielles de la relation avec la technologie », nos études remplissent trois critères sur six. En effet, notre conception de la collaboration cobotique permet à l'humain de modifier certaines caractéristiques de la collaboration (critère de conception continuée) et de disposer de multiples possibilités pour réaliser sa tâche (critère de marge de manœuvre). Nous avons également mesuré le plaisir perçu,

qui est très élevé (critère des aspects hédoniques). En revanche, nous n'avons ni étudié les affects ressentis (critère des affects), ni les valeurs et préférences des opérateurs (critère de sensibilité du sujet). De plus, le degré de maturité de la technologie utilisée ne nous a pas permis d'évaluer l'acceptation située (critère d'acceptation située).

Quatrièmement, parmi les dimensions « collectives », nous ne remplissons qu'un des trois critères. En effet, n'ayant pas eu l'opportunité d'implémenter le cobot sur site, nous n'avons ni désigné de partenaire d'entraide (critère de *supportive coworkers*), ni désigné d'accompagnateur au changement (critère de facilitateur). En revanche, nous avons, dès le début du projet, créé des espaces de discussion autour du projet, de l'activité et de l'implémentation cobotique (critère de régulation collective).

Il semble donc que les cobots, pourvu qu'ils soient adaptés aux variabilités humaines et que leur conception soit guidée par des psychologues du travail et des ergonomes, ont le potentiel d'être réellement capacitants pour les opérateurs.

4.2. Les variabilités, la CCU et l'acceptation située

Nos études mettent en lumière que de nombreuses variabilités sont présentes dans la situation de travail. Celles-ci ont des impacts sur les opérateurs et sur leur activité (e.g. exposition aux risques, fatigue). Nous concluons qu'elles pourraient être prise en charge (en partie) dans le cadre d'une collaboration cobotique. En effet, sur le terrain, une implémentation cobotique pourrait réduire l'exposition aux risques et améliorer la santé de l'opérateur si elle intervenait dans l'activité de nettoyage, de déplacement et d'observation des résultats. Cette aide à la gestion des variabilités pourrait potentiellement rendre la situation de travail plus capacitante pour l'humain en lui permettant de préserver ses ressources tout en atteignant les buts fixés par la tâche. Nos différents TUs semblent également indiquer que la collaboration cobotique amène à une meilleure performance en réduisant (ou en annulant) les effets des variabilités manipulées (e.g. expertise de l'opérateur, charge mentale). Cependant, nous notons que toutes nos études indiquent un allongement du temps de réalisation de la tâche. De plus, il nous semble qu'avant de considérer une implémentation cobotique, il conviendrait d'identifier si les variabilités présentes sur le terrain ne peuvent pas être gérées par l'organisation du travail. Ceci serait, selon nous, plus économique et entraînerait potentiellement moins de changement pour les opérateurs.

L'application de la démarche de CCU a, selon nous, permis que nous respections la majorité des critères de l'ECS défini par Compan (2022). Le respect de ceux-ci est important, car ils garantissent une meilleure acceptation sur le long terme de la technologie par les opérateurs

concernés. Nous avons mis en place une démarche itérative en récoltant les données sur le terrain, qui ont nourris les TUs, dont les résultats ont permis d'améliorer la technologie.

Cependant, pour respecter pleinement cette démarche CCU, il convient d'avoir des retours des opérateurs sur le terrain concernant les améliorations faites sur la technologie de façon continue. Malheureusement, cela n'a pas été possible. La technologie étudiée est trop immature pour risquer une implémentation sur le terrain. Il convient d'effectuer plus de TUs pour l'améliorer davantage. Nous n'avons donc pas pu évaluer l'acceptation située de la technologie par des analyses de l'activité post-implémentation.

En effet, malgré tous nos efforts, notre travail a plusieurs limites que nous allons exposer dans la prochaine partie.

5. Présentation des limites de la thèse

Dans cette partie, nous allons identifier les limites de notre travail afin de contextualiser la recherche et de pouvoir mieux interpréter les résultats. Premièrement, nous commençons par présenter les limites provenant de la revue de littérature. Deuxièmement, nous présentons les limites issues de l'étude sur le terrain. Et troisièmement, nous identifions les limites associées à nos études expérimentales.

Une revue de littérature ne peut, par essence, être parfaitement exhaustive et dépourvue de biais. En effet, il est impossible d'inclure toutes les sources disponibles sur le sujet que l'on traite. La littérature scientifique est constamment en évolution et la multiplication des recherches ne permet pas l'exhaustivité. Même quand elle se veut complète, le temps de sa publication, d'autres sources deviendront disponibles. Sans être immédiatement obsolète, elle ne peut être qu'une photographie de la recherche scientifique à un temps donné et dans un périmètre défini. Pour la revue de littérature sur les variabilités, nous avons arrêté les recherches en 2023 pour être en mesure d'écrire le manuscrit de thèse, cette revue ne prend donc pas en compte toutes les sources sorties après décembre 2023. De plus, la majorité des sources ont été trouvées sur Google Scholar, Web of Sciences, Open Edition, PubMed et PsychInfo. Les sources les plus anciennes ont été trouvées à la bibliothèque universitaire de l'Université Grenoble Alpes. Nous aurions pu obtenir d'autres sources si nous avions cherché dans d'autres bases de données mais celles-ci n'étaient pas disponibles gratuitement. Ce problème d'accès libre a impacté la revue. En effet, de nombreuses sources n'étaient pas accessibles et les auteurs ne répondaient pas aux sollicitations, elles n'ont donc pas été incluses.

Notre étude sur le terrain comporte également des biais. En effet, la temporalité du projet n'a pas permis d'implémentation définitive d'une technologie cobotique, nous n'avons donc pas pu accompagner le changement dans l'entreprise partenaire, et nous n'avons pas de données sur une collaboration humain/cobot au travail située (dans l'activité de travail). Ce délai contraignant n'a également pas permis d'effectuer une analyse de l'activité complète. En effet, nous n'avons pu réaliser qu'une analyse générale, puis focalisée sur un poste de travail. Il n'y a pas eu d'analyses systématiques permettant de répondre à des hypothèses de travail et permettant de caractériser plus finement les impacts des variabilités sur la santé et la performance. Nous n'avons ni coconstruit de futurs process, ni élaboré des simulations sur le terrain en situation de travail. Au total, nous avons passé quatre semaines complètes sur le terrain d'étude. Plus de temps sur le terrain aurait peut-être permis d'obtenir plus de données. Des limites dues aux caractéristiques du laboratoire et des chimistes sont aussi présentes. En effet, nous avons peu eu accès aux opérateurs en manipulation avec la BAG car il y avait peu de projets en BAG pendant nos différentes venues sur site. Plus d'observations sur plus d'opérateurs différents auraient potentiellement donner des résultats différents. La nature confidentielle des travaux menés au sein du laboratoire a contraint le type de données récoltées. En effet, du fait du secret industriel, le recueil de données a été limité. Les photos étaient interdites (hormis les photos sans opérateurs et sans nom de produit) et des enregistrements des entretiens n'ont pas pu être menés. Enfin, il aurait été intéressant que les tests utilisateurs se déroulent avec les utilisateurs finaux, mais l'éloignement géographique entre le lieu de travail et le lieu des tests n'a pas permis d'inclure les chimistes dans nos tests.

Nos expérimentations ne sont également pas exemptes de défauts. Malgré le caractère « contrôlé » des expérimentations, celles-ci comportent des biais inhérents aux études en laboratoire et/ou au contexte de passation. En effet, nous avons notamment mesuré certaines variables en utilisant des mesures auto-rapportées. Ce type de mesure peut amener le biais de désirabilité sociale, le participant peut répondre aux échelles en essayant de « faire plaisir » à l'expérimentateur. Dans notre cas, l'expérimentateur (nous) n'était jamais présent dans la salle pendant que le participant répondait aux questions et tous les participants ont été sujets au même contexte, ce qui nivelle les données. De plus, nos participants étaient, pour la plupart, des étudiants, ce qui limite la généralisation des données obtenus. Également, plus de représentation de certaines catégories d'individus serait souhaitable pour effectuer des tests statistiques : plus de gauchers, plus d'hommes, etc. Dans nos expériences, malgré nos efforts pour nous approcher des caractéristiques du terrain, nous sommes très éloignés du monde du travail. En effet, nous ne pouvons pas faire travailler plusieurs heures les participants et la tâche (contrainte par

l'impossibilité que Yumi a de travailler avec autre chose que des Duplos) s'apparente plus à un jeu qu'à un travail. Nous avons essayé de rendre la tâche très complexe (figure avec de nombreuses couleurs et niveaux) et mentalement exigeante (calculs mathématiques à réaliser en même temps). Cependant, elle reste très éloignée du terrain d'étude sur lequel nous intervenons. Nous avons dû faire face à des limites directement liées à l'utilisation d'un cobot. En effet, c'est une technologie émergente et particulièrement instable qui a nécessité beaucoup d'essais et d'erreurs avant d'être assez robuste pour faire des tests. Par exemple, nous avons mis presque un an entre la condition contrôle de la deuxième étude et la condition expérimentale pour régler les problèmes techniques du cobot. Nous avons envisagé de passer « en magicien d'oz » (un robot piloté par un humain caché, plutôt que programmé), mais cela aurait doté le cobot de capacités d'adaptation en temps réel que nous voulions évaluer. Ce type de problèmes, souvent imprévisibles, couplés à la temporalité contraignante du projet, ont limité le nombre de participants par étude. Également, certains TUs (notamment le premier et le deuxième) ont été réalisées en période de Covid, limitant ainsi le nombre de personnes qui se déplaçaient pour participer aux expériences.

Malgré les limites identifiées, nos différentes études ont permis d'apporter un éclairage sur la notion de variabilités et d'implémentation cobotique.

Recommandations générales

Dans cette partie, nous décrivons les différentes recommandations que nos résultats permettent de formuler. Dans un premier temps, nous formulons des recommandations afin d'identifier les variabilités présentes dans une situation de travail. Dans un second temps, des recommandations pour l'implémentation cobotique sont formulées.

1. Recommandations pour les laboratoires en chimie R&D

Nos résultats permettent de dresser un portrait du laboratoire de chimie R&D idéal selon les opérateurs. En effet, les entretiens menés avec les opérateurs du laboratoire nous conduisent à formuler les recommandations suivantes.

Il conviendrait de faire en sorte de faciliter les communications entre tous les opérateurs mais également entre les différentes équipes pour optimiser l'émulation scientifique et le bien-être des opérateurs. Un management flexible aux demandes et à l'écoute serait aussi à privilégier. Ce management devrait s'adapter aux demandes des opérateurs en termes de distribution de responsabilités. En effet, certains opérateurs souhaitent avoir plus de responsabilité alors que d'autres ne le souhaitent pas. Un minimum de tâches administratives devrait être à la charge des opérateurs et celles-ci devraient avoir du sens pour eux. Des horaires flexibles et la possibilité du télétravail devraient être mis en place. Les locaux des laboratoires devraient être bien entretenus, spacieux et adaptables à l'évolution des activités du site. Pour une recherche performante, des équipements adaptés devraient être fournis avec un processus facilité de maintenance et d'entretien. Les opérateurs devraient se sentir en sécurité à tout instant. Idéalement, ils devraient avoir pris part à la création des processus de sécurité et avoir pu échanger avec l'équipe HSE de la priorisation des informations relatives à la sécurité. Le lien entre équipe HSE et opérateurs ne devrait jamais être rompu. Les opérateurs devraient également avoir un CSE engagé dans leur bien-être et disponible pour écouter et transmettre les informations. Les opérateurs devraient être payés suffisamment pour vivre décemment sans se sentir en danger. Le recours à des prestataires externes pour la gestion de la vie quotidienne du laboratoire devrait être limité au maximum. La communication entre prestataires et opérateurs internes devrait être facilitée pour échanger sur les bons gestes à avoir et sur leurs attentes.

2. Recommandations pour l'identification des variabilités

Notre analyse de la littérature nous amène à conseiller à tous les intervenants dans le cadre d'une implémentation cobotique d'identifier les variabilités présentes sur les postes de travail concernés avant toute introduction technologique. En effet, cette thèse montre que l'absence de

recueil des variabilités issues de la situation de travail amène à faire des erreurs d'implémentation. Ceci est valable pour les cobots, mais nous pensons que l'étude des variabilités est essentielle à tout démarrage de projet qui vise à concevoir une technologie, émergente ou non. Si la technologie ne parvient pas à s'adapter et à répartir efficacement la gestion des variabilités entre l'humain et elle-même, celle-ci a plus de chance d'avoir des impacts négatifs sur l'opérateur et sa tâche, voire d'en créer de nouvelles. Nos études ont montré qu'au contraire, une prise en compte de ces variabilités améliore l'efficacité de la collaboration humain/opérateur. Nous recommandons donc l'identification des variabilités de la situation de travail. Cette identification peut se faire à l'aide de la catégorisation de variabilités créée et présentée dans cette thèse. Celle-ci a été créée pour permettre de faire une liste très détaillée de variabilités.

Cette catégorisation peut être complétée pendant les périodes d'observation de l'activité ainsi que pendant les entretiens avec les opérateurs. Il convient de s'attarder sur chaque type de variabilités afin d'en vérifier la présence. Il convient également de répéter les observations, sur le même poste de travail, avec différents opérateurs afin de bien repérer les variabilités individuelles. Idéalement, l'intervenant devrait observer jusqu'à saturation des données issues du terrain.

Une fois les différentes variabilités prises en note, il convient d'en observer les effets sur les opérateurs et leur tâche (performance, charge mentale, etc.). Pour une intervention idéale, il convient de réaliser une analyse de l'activité complète. En effet, l'analyse systématique permettra de valider les effets supposés de chaque variabilité. Celles ayant un effet potentiellement négatif peuvent être considérées comme des variables à intégrer à la programmation du cobot ou à régler dans la situation de travail afin qu'elles soient gérées efficacement au sein de la collaboration. La variabilité peut aussi rompre la monotonie du travail, être source de créativité, et son étude permet de rendre visible l'intelligence du travail. Il convient alors de faire participer les opérateurs aux repérages des variabilités afin de ne pas appauvrir l'activité en supprimant toute variation.

3. Recommandations pour l'implémentation cobotique

Nos différentes études nous ont permis de mieux appréhender les étapes nécessaires pour implémenter de façon pérenne une collaboration cobotique en situation de travail en limitant les impacts négatifs sur l'opérateur humain et sur sa tâche.

Il convient de commencer par effectuer une analyse de la demande (préférentiellement réalisée par des ergonomes et/ou psychologues du travail). En effet, l'identification des besoins des parties prenantes incluant les opérateurs touchés par le changement est essentielle pour concevoir une technologie adaptée. L'identification des besoins des futurs utilisateurs peut être réalisée à travers une analyse de l'activité en situation. L'analyse permettra de mieux comprendre comment se réalise l'activité, quels sont les processus réels et comment ils diffèrent des processus prescrits par la hiérarchie. Ces processus doivent être coconstruits, l'observation seule ne suffit pas à établir un processus réel de l'activité (Daniellou, 1988). En effet, les opérateurs sont les mieux placés pour comprendre et faire comprendre leur activité, ils doivent donc modifier et valider les processus réalisés par l'intervenant (e.g. entretiens, auto-confrontations, etc.). En effet, il est primordial que les psychologues du travail et les ergonomes soient impliqués dès le démarrage des projets de conception de technologies qui visent à modifier le travail des opérateurs.

Ces analyses doivent permettre d'interroger les forces et les faiblesses des processus ainsi identifiés. Le but étant d'avoir « une réelle prise en compte du travail dans les décisions de transformation (notamment via la mise en œuvre de diagnostics systémiques basés sur des analyses du travail) » (Barcellini, 2015, p. 98). Les intervenants et les opérateurs doivent ensuite coconstruire des processus futurs qui permettent d'optimiser la situation de travail. Cette construction peut être faite par des groupes de travail, des ateliers de simulation sur maquette, etc. Le but est d'obtenir des processus futurs performants et acceptés par tous. Ces processus sont diffusables aux concepteurs, ils les utilisent déjà sous la dénomination « d'arbre des tâches ». Cet outil est un véritable objet intermédiaire facilitant la coconception (Jeantet, 1998).

A la suite de ces analyses, il convient d'aiguiller la conception de la technologie à partir des exigences et des besoins collectés sur la situation de travail (Barcellini, 2015). Cette étape est un moment de collaboration étroite entre les concepteurs (e.g. informaticiens, roboticiens) et les intervenants (psychologue du travail, ergonomes). Les intervenants ont le devoir de porter à la connaissance des concepteurs tous les besoins et les demandes des opérateurs. Ils doivent orienter la conception pour que la technologie soit performante pour réaliser le processus futur établi.

Une fois cette technologie construite, il convient d'effectuer des tests utilisateurs avec les futurs utilisateurs afin de mesurer son utilisabilité, son acceptabilité, etc. Le but est que la technologie soit facile à utiliser et implémentable en situation de travail. Si nécessaire, des rectifications de la technologie doivent être réalisés pour augmenter sa performance et son adaptabilité à l'opérateur et à la tâche (Barcellini, 2020).

« Cette analyse contribue à la mise en évidence des compétences disponibles chez les futurs opérateurs, et d'autres qu'il est souhaitable qu'ils acquièrent [...] ces résultats serviront de base à la réflexion sur le plan de formation » (Daniellou, 1988, p. 189). S'il est nécessaire de recevoir une formation pour utiliser la technologie, c'est à ce moment que les psychologues du travail et ergonome doivent construire cette formation. Elle doit être testée sur des futurs utilisateurs et évaluée en analysant les performances des personnes formées et leurs retours d'expérience. Quand les tests / simulations sont concluants et que la formation est construite et validée, la technologie peut être implémentée sur site. Cette implémentation doit bien être préparée en amont : les opérateurs doivent être en courant de celle-ci et des espaces d'échanges sur la nouvelle activité doivent être mis en place (Guérin et al., 1997, 2021). Quelques jours / mois après l'implémentation, une nouvelle analyse du travail (en incluant la différence prescrit / réel) doit être effectuée sur les postes de travail concernés par l'implémentation. En effet, « la conception d'un artefact se poursuit dans son usage, notamment au travers de ce développement de schèmes d'usages » (Barcellini, 2015, p. 30). Suite à cette analyse, des rectifications doivent être apportées, si nécessaire, pour optimiser la collaboration humain / technologie (Daniellou, 1988).

Pour que l'implémentation se déroule pour le mieux, et pour que les opérateurs puissent s'approprier la technologie convenablement, il convient d'interroger l'éthique derrière ces collaborations humain/technologie au travail. En effet, l'opérateur doit pouvoir comprendre le fonctionnement de la technologie, ainsi que les choix qu'elle a fait. Les décisions prises par un cobot, par exemple, doivent être transparentes pour plusieurs raisons. Premièrement, l'opérateur peut difficilement avoir confiance en une technologie dont il ne sait pas sur quels déterminants celle-ci s'appuie pour faire des choix. Deuxièmement, comment juger de la responsabilité de l'opérateur et de la technologie quand les mécanismes décisionnels de la technologie ne sont pas transparents et identifiables ? De même, un cobot, pour fonctionner correctement, utilise les données de l'opérateur. Celui-ci doit connaître, pour des raisons légales, la nature de ces données et comment elles sont utilisées par le cobot. C'est le devoir éthique des concepteurs et des organisateurs du travail de mettre en lumière ces aspects de transparence et d'explicabilité vis-à-vis des opérateurs qui seront touchés par le changement technologique à leur poste de travail.

Perspectives de recherche

Dans cette partie, nous évoquons des perspectives de recherche qui nous ont paru intéressantes à étudier³⁶.

1. Intérêt de la prise en compte des émotions lors de la collaboration cobotique

Dans la thèse, nous n'avons pas abordé la notion d'émotion dans la collaboration. Cependant, celle-ci est très importante dans l'UX. Elle fait partie du modèle UX que nous avons mobilisé dans la partie théorique de la thèse (Mahlke & Thuring, 2007). Elle y est définie comme le résultat d'une interaction avec l'outil technologique. La valence et l'intensité de cette émotion vont influencer l'utilisation que l'opérateur va faire de la technologie. Cette notion fait également l'objet d'un critère de l'ECS (Compan, 2022). Il serait donc extrêmement important d'étudier l'impact émotionnel de la collaboration. Cela pourrait être fait en utilisant des mesures physiologiques et comportementales (e.g. diamètre de la pupille, électroencéphalogramme) et/ou auto-rapportées (e.g. questionnaire, verbatims).

2. Anthropomorphisation et soumission à l'autorité

Lors de nos expériences, nous avons remarqué différents degrés d'humanisation du cobot. Certains opérateurs semblaient considérer YuMi comme un outil pratique pour réaliser une tâche alors que d'autres le considéraient comme un « collègue ». Il serait intéressant d'étudier ce niveau d'humanisation et les effets qu'il pourrait avoir sur l'opérateur humain et sur sa tâche.

Contrairement à la collaboration humain/humain, la collaboration humain/cobot a permis, malgré un même nombre d'erreurs, de produire un modèle sans erreurs à la fin de la tâche. Les erreurs ont été significativement plus rectifiées au sein de ce type de collaboration. Mais pourquoi ? Nous avons une hypothèse que nous n'avons pas pu tester : l'opérateur a plus confiance en les informations d'un cobot qu'en celles d'un humain. Il a donc plus tendance à se « soumettre » à son autorité pour effectuer la tâche. Dans les binômes humain/humain, nous avons remarqué que beaucoup d'opérateurs avaient conscience qu'il y avait une erreur dans le modèle mais avaient des difficultés à communiquer sur cette erreur à leur collègue humain. En effet, les deux restaient certains de la bonne position des blocks du Duplo qu'ils avaient mis. Pour finir la tâche, l'un des deux humains finissait par « abandonner » le débat et se pliait aux

³⁶ Certaines de ces perspectives nous ont été proposées par des collègues dans le cadre de séminaires, nous les remercions pour leurs contributions éclairées.

propositions de son collègue. Dans les binômes humain/cobot, les opérateurs écoutaient immédiatement les conseils du cobot. En cas de doute, ils vérifiaient plusieurs fois l'état du modèle et les propositions du cobot. Après ces vérifications, ils appliquaient les conseils du cobot ; une fois appliqués, ils verbalisaient leur étonnement de s'être trompés et se mettaient à écouter sans vérifications le cobot. En effet, il y a une confiance haute dans les informations du cobot que nous avons pu mesurer grâce aux questionnaires. Mais jusqu'où peut aller cette confiance ? Et que se passe-t-il si le cobot se trompe ? Il serait intéressant d'étudier ces variables car elles peuvent avoir des conséquences importantes dans les situations de travail où le cobot sera implémenté.

3. Conscience des situations et lenteur acceptable

Il semble que les opérateurs étaient étonnés de la façon qu'a le cobot de se mouvoir dans les premiers temps. Une fois qu'ils avaient vu le type de mouvements qu'il était susceptible de faire, ils semblaient se caler facilement au rythme du cobot et ils verbalisaient parfois même aimer la très grande prévisibilité du cobot (toujours les mêmes mouvements, toujours à la même vitesse, etc.). Cependant, on peut légitimement se demander les conséquences que cette prévisibilité pourrait avoir sur les opérateurs et leur tâche. Est-il possible que cette prévisibilité baisse l'attention de l'opérateur ? Pourrait-elle déclencher de l'ennui ? En effet, une certaine imprévisibilité pourrait permettre à l'humain de rester sur ses gardes, ce qui favorise un taux d'attention élevé qui pourrait favoriser la bonne prise en compte des facteurs de risques de la situation. Il convient d'étudier cette notion plus en profondeur afin de mieux comprendre les impacts potentiellement négatifs sur l'opérateur humain et sa tâche. Cette notion de communication afin d'éveiller la conscience que l'opérateur a de la situation de travail est l'un des WP du projet PACBOT. En effet, dans le cadre de sa thèse, Camblor (2024) a proposé des recommandations afin d'aiguiller les concepteurs dans la réalisation des mouvements du robot afin d'informer convenablement l'humain. « Les mouvements de signalisation du robot doivent principalement concerner la tâche partagée par l'humain et le robot [...] l'opérateur doit pouvoir comprendre et projeter les actions de son partenaire robotique pendant la tâche » (Camblor, 2024, p. 113). Dans le cadre du deuxième TU, nous avons, en parallèle de la réalisation de l'expérience (Cf. Étude 3, Chapitre 1), enregistré les échanges verbaux des 61 binômes de participants afin de mieux comprendre les besoins des humains lors d'une tâche de collaboration avec un autre humain. Après les avoir entièrement retranscrits, nous avons identifié des thèmes grâce aux occurrences de verbatims à l'aide du logiciel QDA Miner Lite. Nous avons pu identifier que 44,3% des échanges consistaient en des dons d'informations

concrètes sur les éléments de la tâche, 45,8% des échanges étaient des régulations dans l'organisation de la tâche et 9,9% étaient des questions sur les éléments concrets de la tâche. Ces données ont aiguillé la conception du cobot par la suite pour qu'il soit le plus adapté possible à l'humain. Dans une future expérience, il serait avantageux d'utiliser les données récoltées par l'analyse des échanges verbaux, les recommandations concernant les mouvements de signalisation, ainsi que les critères ergonomiques de conception d'interactions (Scapin & Bastien, 1997) pour obtenir un cobot le plus adapté possible à l'opérateur et à sa tâche.

La collaboration cobotique amène cependant une certaine lenteur de réalisation de tâche comparativement à une collaboration humain/humain. Ce type de collaboration permet une meilleure qualité de sortie du modèle ainsi que moins d'expositions aux risques mais augmente le temps de réalisation de tâche. Il convient d'étudier l'effet qui pourrait potentiellement avoir cette lenteur. Permet-elle à l'humain de ne pas s'épuiser en allant trop vite ? Ou alors pourrait-elle provoquer de la frustration si cet humain a conscience qu'il pourrait aller plus vite sans cobot ? Des expériences seraient nécessaires avant implémentation afin de déterminer la valence des effets.

4. Invisibilisation des compétences dans la collaboration cobotique

Les résultats de notre deuxième TU ont montré un lissage de l'effet de l'expérience par la collaboration humain/cobot. Pour rappel, quand l'humain travaille avec un cobot, son expérience à la tâche n'a pas d'effet sur la réussite de celle-ci (il fait cependant moins d'erreurs). Ce constat nous invite à questionner alors la valeur de l'expérience de l'opérateur. Toutes les méthodes, les connaissances qu'il a acquises restent-elles utiles face à l'expertise du cobot ? Aussi, si tous les opérateurs (même les novices) travaillent avec le cobot, vont-ils développer autant de compétences que les experts qui ont commencé à travailler sans cobot ? Et quelle que soit la réponse à cette question, en quoi est-ce important ? Il convient de s'interroger sur cette notion de lissage d'expérience et de compétence sur le terrain avant implémentation pour ne pas risquer de perdre de précieuses compétences. Dans ce cadre, nous pourrions analyser l'activité d'opérateurs experts et novices lors d'activité en collaboration cobotique. Les entretiens nous permettraient d'interroger la notion d'expertise et son importance pour les opérateurs.

5. Acceptation située et entretiens dans le cadre d'une collaboration cobotique

De nouveaux TUs sont nécessaires pour peaufiner la conception d'un cobot adapté à l'activité de R&D en chimie. Dans ce cadre, il serait intéressant d'utiliser la méthode de l'auto-

confrontation où les participants regardent le film de leur propre activité avec le cobot et le commentent (Clot et al., 2000). L'allo-confrontation pourrait être aussi intéressante, c'est-à-dire l'entretien du participant qui regarde le film de l'activité d'un autre participant (Philippette, 2016). En effet, les réactions du participant au vu de sa performance peuvent être très informatives. Les participants ne verbalisent pas toujours leurs décisions pendant qu'ils les prennent, également, ils n'ont pas toujours conscience des gestes qu'ils réalisent. Un entretien face à des films de l'activité permettrait d'identifier des comportements, des choix, dont nous n'avons pas connaissance et qui pourraient avoir des conséquences importantes sur l'implémentation du système cobotique en industrie. De plus, ce type d'entretien pourrait permettre d'appréhender les réactions émotionnelles, les ressentis physiques, que nous pouvons difficilement obtenir autrement qu'au cours d'un entretien. Ce type d'entretien serait également très utile dans le cadre d'une analyse de l'acceptation située d'une implémentation cobotique en situation de travail.

6. Variabilités et cobotique

Et pour conclure les perspectives de recherche, nous avons identifié de nombreuses variabilités dont les effets dans le cadre d'une implémentation cobotique n'ont pas été testés. Le tableau présent en annexe (Cf. Annexe 12) dresse la liste des variabilités à explorer dans de futures études. Dans les manipulations expérimentales qui serviront à tester ces variabilités, il convient de faire en sorte que la tâche soit plus proche de la réalité du travail et que les participants soient plus représentatifs des utilisateurs futurs. Il serait également intéressant de réaliser une nouvelle revue de littérature dans une dizaine d'années afin de suivre l'évolution de l'étude des variabilités en condition d'implémentation cobotique.

Nous avons identifié de nombreuses perspectives de recherches qu'il convient de mettre en place à la suite de la thèse. Nous pouvons à présent conclure cette thèse. La prochaine partie propose une conclusion générale à cette thèse.

Conclusion générale

Cette thèse examine l'intérêt de repérer les variabilités des situations de travail pour la conception d'une assistance cobotique. Elle met en lumière les défis liés à la prise en compte de ces variabilités, notamment les variabilités individuelles et celles liées à la tâche, ainsi que l'exposition aux risques et les conditions de travail. Dans ce cadre, une revue de littérature sur le concept de variabilité a rendu possible l'intégration des différents modèles issus de la littérature. Cette revue a également permis la création d'une catégorisation des variabilités à l'attention des psychologues du travail et des ergonomes. De plus, la thèse se concentre sur l'analyse d'une situation de travail, ainsi que sur la conception et le test des systèmes de collaboration humain/cobot dans des environnements de travail dynamiques et variables dans une démarche de Conception Centrée Utilisateurs. Ainsi, une méthode itérative d'amélioration d'un système cobotique a été utilisée permettant aux données issues du terrain d'adapter la technologie aux besoins des opérateurs. De plus, ces données ont permis de proposer des améliorations *in situ* dans l'organisation du travail du laboratoire de Recherche & Développement en chimie.

À travers une approche multidisciplinaire (psychologie du travail, ergonomie, robotique et informatique), la thèse analyse les impacts des collaborations cobotiques et propose des méthodes et des outils pour les anticiper et les gérer efficacement. Elle explore les aspects techniques, psychologiques et organisationnels de la collaboration humain-robot au travail, en mettant l'accent sur la flexibilité des systèmes et l'adaptation aux changements de la situation de travail. Les trois études expérimentales ont amené à explorer différentes programmations cobotiques afin de déterminer les meilleures méthodes à utiliser dans la conception d'un cobot pour assister au mieux l'opérateur dans son travail. Ce travail met en évidence les avantages non négligeables d'utiliser des paradigmes expérimentaux dans le champ de la psychologie du travail et de l'ergonomie, plus particulièrement de l'ergonomie de conception.

Les résultats de la thèse fournissent des recommandations pratiques pour concevoir des systèmes de collaboration cobotique robustes et sécurisés, capables de s'adapter de manière proactive aux variabilités de l'opérateur, de l'environnement et des tâches. Ces conclusions contribuent à améliorer la performance, la fiabilité, l'acceptabilité et l'acceptation des technologies cobotiques dans des contextes industriels et expérimentaux. Elle ouvre de nombreuses perspectives de recherche dans le domaine.

Bibliographie

- Accorsi, R., Tufano, A., Gallo, A., Galizia, F. G., Cocchi, G., Ronzoni, M., Abbate, A., & Manzini, R. (2019). An application of collaborative robots in a food production facility. *Procedia Manufacturing*, 38, 341-348. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.044>
- Agarwal, R., & Prasad, J. (1997). The Role of Innovation Characteristics and Perceived Voluntariness in the Acceptance of Information Technologies. *Decision Sciences*, 28(3), 557-582. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1997.tb01322.x>
- Ajzen, I. (1989). Attitude structure and behavior. In A.R. Pratkanis, S. J. Breckker, & A. G. Greenwald (Eds.), *Attitude structure and function* (pp. 241-274). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 50(2). [https://doi.org/10.1016/0749-5978\(91\)90020-T](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T)
- Alben, L. (1996). Quality of experience: defining the criteria for effective interactions design. *Interactions*, 3(3), 11-15. <https://doi.org/10.1145/235008.235010>
- Alebooyeh, M., Wang, B., & Urbanic, R. J. (2020). *Performance Study of an Innovative Collaborative Robot Gripper Design on Different Fabric Pick and Place Scenarios*. SAE Technical Paper, 2020-01-1304. <https://doi.org/10.4271/2020-01-1304>
- Anastassova, M. (2006). *L'analyse ergonomique des besoins en amont de la conception de technologies émergente : Le cas de la Réalité Augmentée pour la formation à la maintenance automobile* [Phdthesis, Université René Descartes - Paris V]. <https://theses.hal.science/tel-00340103>
- Antonelli, D., & Bruno, G. (2019). Dynamic distribution of assembly tasks in a collaborative workcell of humans and robots. *FME Transactions*, 47(4), 723-730. <https://doi.org/10.5937/fmet1904723A>

- Azouaghe, S., & Landry, A. (2021, juillet). *Industrie 4.0 : Quels enjeux et conséquences pour la santé des employés, l'activité professionnelle et l'organisation du travail ?* 21e congrès de l'Association Internationale de Psychologie du Travail de Langue Française, Paris.
- Bader, K. B., Hendley, S. A., & Bollen, V. (2021). Assessment of Collaborative Robot (Cobot)-Assisted Histotripsy for Venous Clot Ablation. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 68(4), 1220-1228. <https://doi.org/10.1109/TBME.2020.3023630>
- Barcellini, F. (2015). *Développer des interventions capacitantes en conduite du changement. Comprendre le travail collectif de conception, agir sur la conception collective du travail*. [Thesis, Université de Bordeaux]. <https://theses.hal.science/tel-01150586>
- Barcellini, F. (2020). Quelles conceptions de la coopération humains-robots collaboratifs ? : Une expérience de participation au projet de conception d'un démonstrateur de robotique collaborative. *Activités*, 17(1). <https://doi.org/10.4000/activites.5007>
- Barcellini, F., Béarée, R., Benchekroun, T.-H., Bounouar, M., Buchmann, W., Dubey, G., Lafeuillade, A.-C., Moricot, C., Rosselin-Bareille, C., Saraceno, M., & Siadat, A. (2023). Promises of industry 4.0 under the magnifying glass of interdisciplinarity : Revealing operators and managers work and challenging collaborative robot design. *Cognition, Technology & Work*, 25(2-3), 251-271. <https://doi.org/10.1007/s10111-023-00726-6>
- Barcellini, F., Van Belleghem, L., & Daniellou, F. (2013). Les projets de conception comme opportunité de développement des activités. In P. Falzon (Éd.), *Ergonomie constructive*, (pp. 191-206). Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.falzo.2013.01.0191>

- Barcenilla, J., & Bastien, J. M. C. (2009). L'acceptabilité des nouvelles technologies : Quelles relations avec l'ergonomie, l'utilisabilité et l'expérience utilisateur ? *Le travail humain*, 72(4), 311-331.
- Barthe, B., Quéinnec, Y., & Verdier, F. (2004). L'analyse de l'activité de travail en postes de nuit : Bilan de 25 ans de recherches et perspectives. *Le travail humain*, 67(1), 41-61.
- Bayram, Z. & Larcher, C. (2012). A Review of Controlling the Laboratory Activity in Chemistry according to Chemist's Views. *Education and Science*, 37(164).
- Béguin, P., & Cerf, M. (2004). Formes et enjeux de l'analyse de l'activité pour la conception des systèmes de travail. *Activités*, 01(1-1). <https://doi.org/10.4000/activites.1156>
- Béguin, P., Kazmierczak, M., Vicot, P., & Cottura, R. (1999, septembre). Conception d'une alarme et gestion des risques dans la chimie : Vers une approche développementale. 34è. *Congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française*, Caen, France. <https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00972187>
- Bendel, O. (2018). Co-robots from an Ethical Perspective. In R. Dornberger (Éd.), *Business Information Systems and Technology 4.0 : New Trends in the Age of Digital Change* (pp. 275-288). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74322-6_18
- Benhabib, N., Padois, V., & Daney, D. (2021). *An approach to quantify manual expertise with collaborative robotics in mind*. <https://hal.inria.fr/hal-03172351>
- Blanchet, A., & Gotman, A. (1992). *L'enquête et ses méthodes : L'entretien*. Nathan.
- Bloss, R. (2016). Collaborative robots are rapidly providing major improvements in productivity, safety, programing ease, portability and cost while addressing many new applications. *Industrial Robot: An International Journal*, 43(5), 463-468. <https://doi.org/10.1108/IR-05-2016-0148>

- Bobillier Chaumon, M.-É. (2016). L'acceptation située des technologies dans et par l'activité : Premiers étayages pour une clinique de l'usage. *Psychologie du Travail et des Organisations*, 22(1), 4-21. <https://doi.org/10.1016/j.pto.2016.01.001>
- Bobillier Chaumon, M.-É. (2017). Du rôle des TIC dans la transformation digitale de l'activité et de la santé au travail | Agence nationale pour l'amélioration des conditions de travail (Anact). *Revue des conditions de travail*, 6(9).
- Bobillier Chaumon, M.-É. (2021). Exploring the Situated Acceptance of Emerging Technologies in and Concerning Activity: Approaches and Processes. In M. É. Bobillier Chaumon (Éd.). *Digital Transformations in the Challenge of Activity and Work* (pp. 237-256). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119808343.ch18>
- Bobillier Chaumon, M.-É. (2021). Technologies émergentes et transformations digitales de l'activité : Enjeux pour l'activité et la santé au travail. *Psychologie du Travail et des Organisations*, 27(1), 17-32. <https://doi.org/10.1016/j.pto.2021.01.002>
- Bobillier-Chaumon, M.-É. (2013). *Conditions d'usage et facteurs d'acceptation des technologies de l'activité : Questions et perspectives pour la psychologie du travail* [Habilitation à diriger des recherches, Ecole doctorale Sciences de l'Homme, du Politique, et du Territoire]. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/tel-01559686>
- Bogue, R. (2016). Europe continues to lead the way in the collaborative robot business. *Industrial Robot: An International Journal*, 43(1), 6-11. <https://doi.org/10.1108/IR-10-2015-0195>
- Bouillet, K., Lemonnier, S., Clanche, F., & Gauchard, G. (2023). Does the introduction of a cobot change the productivity and posture of the operators in a collaborative task? *PLOS ONE*, 18(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289787>

- Bourgeois, F., & Hubault, F. (2005). Prévenir les TMS : De la biomécanique à la revalorisation du travail, l'analyse du geste dans toutes ses dimensions. *Activités*, 02(1). <https://doi.org/10.4000/activites.1561>
- Brangier, É., Dufresne, A., & Hammes-Adelé, S. (2009). Approche symbiotique de la relation humain-technologie : Perspectives pour l'ergonomie informatique. *Le Travail humain*, 72(4), 333-353. <https://doi.org/10.3917/th.724.0333>
- Brangier, E., & Valléry, G. (2021). *Ergonomie : 150 notions clés*. Dunod.
- Camblor, B. (2024). *Exploitation du mouvement du robot pour améliorer la conscience de la situation dans la collaboration humain-robot* [Thèse de doctorat]. Université de Bordeaux.
- Cardoso, A., Colim, A., Bicho, E., Braga, A. C., Menozzi, M., & Arezes, P. (2021). Ergonomics and Human Factors as a Requirement to Implement Safer Collaborative Robotic Workstations : A Literature Review. *Safety*, 7(4), 71. <https://doi.org/10.3390/safety7040071>
- Caroly, S. (2011). Activité collective et réélaboration des règles comme ressources pour la santé psychique : Le cas de la police nationale. *Le travail humain*, 74(4), 365-389. <https://doi.org/10.3917/th.744.0365>
- Caroly, S., & Barcellini, F. (2013). Le développement de l'activité collective. In P. Falzon (Éd.), *Ergonomie Constructive* (pp. 33-46). Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.falzo.2013.01.0033>
- Caroly, S., Rémy, H., Kevin, G., & Aurélie, L. (2019). Le travail digital, un enjeu pour les psychologues du travail. L'exemple de l'industrie 4.0. *Journal des psychologues*, 367(5), 27-32. DOI: 10.3917/jdp.367.0027
- Carroll, L. (1871). *Through the Looking-Glass, and What Alice Found There*. Macmillan & Co.

- Cegarra, J., & Morgado, N. (2009). *Étude des propriétés de la version francophone du NASA-TLX*. COOP'2000. <https://docplayer.fr/21755956-Etude-des-proprietes-de-la-version-francophone-du-nasa-tlx.html>
- Chacón, A., Ponsa, P., & Angulo, C. (2020). On Cognitive Assistant Robots for Reducing Variability in Industrial Human-Robot Activities. *Applied Sciences*, 10(15), 5137. <https://doi.org/10.3390/app10155137>
- Chapanis, A. (1953). Psychology and the Instrument Panel. *Scientific American*, 188(4), 74-82. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0453-74>
- Chen, N., Huang, N., Radwin, R., & Li, J. (2022). Analysis of assembly-time performance (ATP) in manufacturing operations with collaborative robots : A systems approach. *International Journal of Production Research*, 60(1), 277-296. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2000060>
- Cippelletti, E. (2017). *Aide à la conception, test de l'usage et de l'acceptation d'un logiciel de maintenance* [Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes (ComUE)]. <https://www.theses.fr/2017GREAH038>
- Cippelletti, E., Azouaghe, S., Pellier, D., & Landry, A. (2023). Assessing MSDs before Introduction of a Cobot : Psychosocial Aspects and Employee's Subjective Experience. *Relations Industrielles / Industrial Relations*, 78(1). <https://doi.org/10.7202/1101311ar>
- Cippelletti, E., Fournier, É., Jeoffrion, C., & Landry, A. (En édition). Assessing cobot's acceptability of French workers: Proposition of a model integrating the TAM3, the ELSI and the meaning of work scales. *International Journal of Human-Computer Interaction*.
- Clot, Y. (2015). *Le travail à coeur. Pour en finir avec les risques psychosociaux*. La Découverte.

- Clot, Y., Faïta, D., Fernandez, G., & Scheller, L. (2000). Entretiens en autoconfrontation croisée : Une méthode en clinique de l'activité. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, 2-1. <https://doi.org/10.4000/pistes.3833>
- Colgate, J. E., Wannasuphprasit, W., & Peshkin, M. A. (1996). Cobots: robots for collaboration with human operators. *Proceedings of the 1996 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 433-439. <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=0030402971&partnerID=8YFLogxK>
- Compan, N. (2022). *Intérêt de la situation de collaboration capacitante pour une approche ergonomique des situations de travail industrielles intégrant des technologies émergentes* [Thèse de doctorat, Université Clermont Auvergne]. <https://theses.fr/2022UCFAL019>
- Compan, N., Coutarel, F., Brissaud, D., & Rix-Lievre, G. (2022). Enabling Collaborative Situations (ecs) : Interest for the Taking into Account of the Work Activity in the Design and Evaluation of Human-Technology Collaborations in Contemporary Industry. *Le Travail humain*, 85(3), 211-240.
- Couroussé, D., & Florens, J.-L. (2007). Cobot. In W. Aprile, F. Avanzini, J. Barbero, B. Bardy, R. Boulic, et al. *Enaction and Enactive Interfaces: A Handbook of Terms* (pp. 36-37). Enactive Systems Books. <https://hal.science/hal-00978947>
- Coutarel, F., Caroly, S., Vézina, N., & Daniellou, F. (2015). Marge de manœuvre situationnelle et pouvoir d'agir : Des concepts à l'intervention ergonomique. *Le Travail Humain*, 78(1), 9-29.
- Crowe, S. (2018, mars 12). *Universal Robots Sees Strong Growth in Asia*. The Robot Report. Consulté le 4 février 2024. <https://www.therobotreport.com/universal-robots-strong-growth-asia/>

- Damodaran, L. (1996). User involvement in the systems design process-a practical guide for users. *Behaviour & Information Technology*, 15(6), 363-377.
<https://doi.org/10.1080/014492996120049>
- Daniellou, F. (1988). Ergonomie et démarche de conception dans les Industries de processus continus Quelques Étapes Clés. *Le Travail Humain*, 51(2), 185-194.
- Davis, F. D. (1989). Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*, 13(3). <https://doi.org/10.2307/249008>
- Davis, F. D., Bagozzi, R. P., & Warshaw, P. R. (1989). User Acceptance of Computer Technology : A Comparison of Two Theoretical Models. *Management Science*, 35(8).
<https://doi.org/10.1287/mnsc.35.8.982>
- De La Garza, C., & Weill-Fassina, A. (1995). Les modalités de gestion collective des risques ferroviaires sur des chantiers d'entretien des voies. *Recherche. Transports. Sécurité.*, 49, 73-84.
- Desrumaux, P. (2010). Le travail, risque psychosocial ou facteur d'épanouissement ? De la survie au bien-être. *Le Journal des psychologues*, 283(10), 26-30.
<https://doi.org/10.3917/jdp.283.0026>
- Djuric, A. M., Urbanic, R. J., & Rickli, J. L. (2016). A Framework for Collaborative Robot (CoBot) Integration in Advanced Manufacturing Systems. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 9(2), 457-464.
- Djuric, A., Rickli, J., Sefcovic, J., Hutchison, D., & Goldin, M. M. (2019, janvier). *Integrating Collaborative Robots in Engineering and Engineering Technology Programs*. ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition.
<https://doi.org/10.1115/IMECE2018-88147>
- Duros, V., Grizou, J., Sharma, A., Mehr, S. H. M., Bubliauskas, A., Frei, P., Miras, H. N., & Cronin, L. (2019). Intuition-Enabled Machine Learning Beats the Competition When

- Joint Human-Robot Teams Perform Inorganic Chemical Experiments. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 59(6), 2664-2671.
<https://doi.org/10.1021/acs.jcim.9b00304>
- Dwivedi, Y. K., Rana, N. P., Chen, H., & Williams, M. D. (2011). A Meta-analysis of the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT). In M. Nüttgens, A. Gadatsch, K. Kautz, I. Schirmer, & N. Blinn (Éds.), *Governance and Sustainability in Information Systems. Managing the Transfer and Diffusion of IT*, 155-170. Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-24148-2_10
- El Zaatari, S., Marei, M., Li, W., & Usman, Z. (2019). Cobot programming for collaborative industrial tasks : An overview. *Robotics and Autonomous Systems*, 116, 162-180.
<https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.03.003>
- European Commission. (2021). *Industry 5.0 : Towards a sustainable, human centric and resilient European industry* (KI-BD-20-021-FR-N). Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/308407>
- Fager, P., Calzavara, M., & Sgarbossa, F. (2019). Kit Preparation with Cobot-supported Sorting in Mixed Model Assembly. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1878-1883.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.476>
- Fernagu Oudet, S. (2012). Chapitre 14. Favoriser un environnement « capacitant » dans les organisations. In É. Bourgeois (Éd.), *Apprendre au travail* (pp. 201-213). Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.bourg.2012.01.0201>
- Février, F. (2011). *Vers un modèle intégrateur « expérience-acceptation » : Rôle des affects et de caractéristiques personnelles et contextuelles dans la détermination des intentions d'usage d'un environnement numérique de travail* [Thèse de doctorat, Rennes 2].
<https://www.theses.fr/2011REN20011>

- Fishbein, M., & Ajzen, I. (1975). *Belief, Attitude, Intention, and Behavior: An Introduction to Theory and Research*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Flavián, C., Guinalú, M., & Gurrea, R. (2006). The role played by perceived usability, satisfaction and consumer trust on website loyalty. *Information & Management*, 43(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.im.2005.01.002>
- Fogg, B. J., & Tseng, H. (1999). The elements of computer credibility. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, 80-87. <https://doi.org/10.1145/302979.303001>
- Folcher, V., & Rabardel, P. (2004). Hommes, artefacts, activités : perspective instrumentale. In P. Falzon (Éd.), *L'ergonomie* (pp. 251-268). Presses Universitaires de France.
- Forest, J., & Morin, E. (2007). Promouvoir la santé au travail : Donner un sens au travail. *Gestion*, 32(2). https://www.academia.edu/27810517/Promouvoir_la_sant%C3%A9_au_travail_Donner_un_sens_au_travail
- Fournier, É., Jeoffrion, C., & Landry, A. (2023). Chemist operators in the laboratory of the future: What activity? *Conference Proceedings of the Société d'Ergonomie de Langue Française (SELF)*, 157-162 [Ergonomics Abstracts]. <https://doi.org/10.1080/24725838.2022.2072021>
- Fournier, É., Kilgus, D., Landry, A., Hmedan, B., Pellier, D., Fiorino, H., & Jeoffrion, C. (2022). The Impacts of Human-Cobot Collaboration on Perceived Cognitive Load and Usability during an Industrial Task: An Exploratory Experiment. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 10(2), 1-8. <https://doi.org/10.1080/24725838.2022.2072021>
- Fournier, É., Jeoffrion, C., Hmedan, B., Pellier, D., Fiorino, H., Landry, A. Human-cobot collaboration's impact on success, time completion, errors, workload, gestures and

- acceptability during an assembly task. *Applied Ergonomics*, 119(104306).
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2024.104306>
- Friard, O., & Gamba, M. (2016). BORIS: a free, versatile open-source event-logging software for video/audio coding and live observations. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(11), 1325-1330. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12584>
- Galín, R. R., Mamchenko, M. V., & Romanov, N. A. (2020). Business Processes Automation in a Production Facility Through the Use of Collaborative Robots. *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271476>
- Garden, N. B. (1962). *Report on Glove Boxes and Containment Enclosures* (TID-16020). Ad Hoc Committee on Glove Boxes. <https://doi.org/10.2172/4791245>
- Gardner, D. G., Dunham, R. B., Cummings, L. L., & Pierce, J. L. (1989). Focus of attention at work : Construct definition and empirical validation. *Journal of Occupational Psychology*, 62(1), 61-77. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8325.1989.tb00478.x>
- Girard, A. (à paraître) *De la gestion des risques à la construction de la sécurité dans le métier de guide de montagne : prendre et faire prendre des risques en sécurité*. [Thèse de doctorat en ergonomie, Université Grenoble Alpes].
- Giusti, L., & Marti, P. (2006). *Interpretative dynamics in human robot interaction*. Conference Proceedings of the 15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 111-116.
- Gollac, M., & Bodier, M. (2011). *Mesurer les facteurs psychosociaux de risque au travail pour les maîtriser*. DARES, Ministère du travail et de l'emploi, 223. http://travail-emploi.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_SRPST_definitif_rectifie_11_05_10.pdf

- Goujon, A., Rosin, F., Magnani, F., Lamouri, S., & Pellerin, R. (2023). *Modèle de cas d'usage pour l'industrie 5.0*. CIGI Qualita MOSIM 2023, Trois-Rivières, Québec, Canada. <https://collection-numerique.uqtr.ca/id/eprint/2087/>
- Grondin, N., Bastien, J. M. C., & Agopian, B. (2002). Les tests utilisateurs : Avantages et inconvénients des passations individuelles et par paires. *Proceedings of the 14th Conference on l'Interaction Homme-Machine*, 121-128. <https://doi.org/10.1145/777005.777022>
- Gualtieri, L., Rauch, E., & Vidoni, R. (2021). Methodology for the definition of the optimal assembly cycle and calculation of the optimized assembly cycle time in human-robot collaborative assembly. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(7-8), 2369-2384. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06653-y>
- Gualtieri, L., Rauch, E., & Vidoni, R. (2022). Development and validation of guidelines for safety in human-robot collaborative assembly systems. *Computers & Industrial Engineering*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107801>
- Guérin, F., Laville, A., Daniellou, F., Durrafourg, J., & Kerguelen, A. (1997). *Comprendre le travail pour le transformer* (3ème édition). Réseau ANACT éditions.
- Guérin, F., Pueyo, V., Béguin, P., Garrigou, A., Hubault, F., Maline, J., & Morlet, T. (2021). *Concevoir le travail, le défi de l'ergonomie*, Octarès Editions.
- Hart, S. G. (2006). NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50(9), 904-908. <https://doi.org/10.1177/1541931206050009>
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index) : Results of Empirical and Theoretical Research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Advances in Psychology*, 52, 139-183. North-Holland. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)

- Hassenzahl, M. (2003). The Thing and I: Understanding the Relationship Between User and Product. In M. A. Blythe, K. Overbeeke, A. F. Monk, & P. C. Wright (Éds.), *Funology: From Usability to Enjoyment*, 31-42. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/1-4020-2967-5_4
- Hassenzahl, M. (2004). The Interplay of Beauty, Goodness, and Usability in Interactive Products. *Human-Computer Interaction*, 19(4), 319-349. https://doi.org/10.1207/s15327051hci1904_2
- Hassenzahl, M. (2008). User experience (UX): Towards an experiential perspective on product quality. *Proceedings of the 20th Conference on l'Interaction Homme-Machine*, 11-15. <https://doi.org/10.1145/1512714.1512717>
- Hellier, E., Edworthy, J., & Lee, A. (2001). An Analysis of Human Error in the Analytical Measurement Task in Chemistry. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 5(4), 445-458. https://doi.org/10.1207/S15327566IJCE0504_5
- Hellriegel, D., & Slocum, J. W. (2006). *Management des organisations*. De Boeck Supérieur. 727.
- Hentout, A., Aouache, M., Maoudj, A., & Akli, I. (2019). Human–robot interaction in industrial collaborative robotics: A literature review of the decade 2008–2017. *Advanced Robotics*, 33(15-16), 764-799. <https://doi.org/10.1080/01691864.2019.1636714>
- Hornbæk, K., & Law, E. L.-C. (2007). Meta-analysis of correlations among usability measures. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 617-626. <https://doi.org/10.1145/1240624.1240722>
- INRS (2018). *Dossier Robots collaboratifs*. Consulté le 8 septembre 2023. www.inrs.fr/risques/robots-collaboratifs.html
- ISO (1999). *ISO 13 407. Processus de conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs*.

- Jeantet, A. (1998). Les objets intermédiaires dans la conception. Éléments pour une sociologie des processus de conception. *Sociologie du travail*, 40(3), 291-316. <https://doi.org/10.3406/sotra.1998.1333>
- Joblot, L., Florian, M., Rosin, F., Pellerin, R., & Passalacqua, M. (2023, juin). Protocole expérimental visant l'étude de l'IA centrée sur l'humain dans le contexte de l'Industrie 5.0: Application en réalité augmentée. *CIGI QUALITA MOSIM 2023*. <https://hal.science/hal-04142374>
- Johnson, M., Liu, R., Gopalan, N., & Gombolay, M. (2021). An Approach to Human-Robot Collaborative Drilling and Fastening in Aerospace Final Assembly. In *AIAA Scitech 2021 Forum*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2021-0270>
- Kábele, P., & Edl, M. (2020). Workplace Optimization Using a Collaborative Robot. In V. Ivanov, J. Trojanowska, I. Pavlenko, J. Zajac, & D. Peraković (Eds.), *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*, 137-146. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_14
- Karsenty, L. (2011). Confiance interpersonnelle et communications de travail. *Le Travail humain*, 74, 131-155.
- Karsenty, L. (2018, juillet 20). Quand le changement affecte l'identité professionnelle et dégrade la confiance. *47ème Congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française*, Lyon, France.
- Kinast, A., Doerner, K. F., & Rinderle-Ma, S. (2021). Biased random-key genetic algorithm for cobot assignment in an assembly/disassembly job shop scheduling problem. *Procedia Computer Science*, 180, 328-337. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.170>

- Kjeldskov, J., & Graham, C. (2003). A Review of Mobile HCI Research Methods. In L. Chittaro (Ed.), *Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, 317-335. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-45233-1_23
- Knudsen, M., & KaiVo-Oja, J. (2020). Collaborative Robots: Frontiers of Current Literature. *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, 13-20. <https://doi.org/10.38016/jista.682479>
- Kohler, D., & Weisz, J.-D. (2018). Industrie 4.0, une révolution industrielle et sociétale. *Futuribles*, 424(3), 47-68. <https://doi.org/10.3917/futur.424.0047>
- Kouabenan, D. R. (2008). Rôle des croyances dans le management de la sécurité. *Congrès de l'Association Francophone de Gestion des Ressources Humaines*, Dakar.
- Kuderer, M., Gulati, S., & Burgard, W. (2015). Learning driving styles for autonomous vehicles from demonstration. *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2641-2646. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139555>
- Lagomarsino, M., Lorenzini, M., Balatti, P., Momi, E. D., & Ajoudani, A. (2022). Pick the Right Co-Worker: Online Assessment of Cognitive Ergonomics in Human-Robot Collaborative Assembly. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/TCDS.2022.3182811>
- Lallemand, C. (2018). *Méthodes de Design UX. 30 méthodes fondamentales pour concevoir des expériences optimales*. (2e éd.). Eyrolles.
- Lallemand, C., & Koenig, V. (2017). How Could an Intranet be Like a Friend to Me? Why Standardized UX Scales Don't Always Fit. *Proceedings of the European Conference on Cognitive Ergonomics*, 9-16. <https://doi.org/10.1145/3121283.3121288>
- Landry, A., & Caroly, S. (à paraître). Analyser les pôles du sens de l'activité pour accompagner les nouvelles prescriptions du travail. @ctivité.

- Landry, A., Cippelletti, E., & Azouaghe, S. (2022, novembre). L'introduction d'un robot collaboratif dans une chaîne de fabrication : Comment réduire les facteurs de risque de TMS tout en conservant le sens du travail ? *4^{ème} Congrès Francophone sur les TMS*, Monastir, Tunisie.
- Le Bellu, S., Lahlou, S., & Nosulenko, V. (2010). Capter et transférer le savoir incorporé dans un geste professionnel. *Social Science Information*, *49*(3), 371-413.
- Lee, H., Liao, Y. Y., Kim, S., & Ryu, K. (2020). Model-Based Human Robot Collaboration System for Small Batch Assembly with a Virtual Fence. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, *7*(3), 609-623. <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00214-6>
- Leite, I., Martinho, C., & Paiva, A. (2013). Social Robots for Long-Term Interaction : A Survey. *International Journal of Social Robotics*, *5*(2), 291-308. <https://doi.org/10.1007/s12369-013-0178-y>
- Leplat, J. (2006). La notion de régulation dans l'analyse de l'activité. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, *8-1*. <https://doi.org/10.4000/pistes.3101>
- Leplat, J., & Cuny, X. (1977). *Introduction à la psychologie du travail*. Presses Universitaires de France.
- Lesgauchers. (2017, octobre 31). *9 millions de gauchers ...* <https://www.lesgauchers.com/information/gaucher-9-millions-en-france>
- Letirand, F., & Delhomme, P. (2006). Accessibilité des croyances associées aux deux options d'une alternative comportementale. Une piste à explorer pour mieux expliquer le comportement de vitesse des jeunes conducteurs ? *Les Cahiers Internationaux de Psychologie Sociale*, *69*(1), 3-14. <https://doi.org/10.3917/cips.069.0003>
- Liu, L., Guo, F., Zou, Z., & Duffy, V. G. (2022). Application, Development and Future Opportunities of Collaborative Robots (Cobots) in Manufacturing: A Literature Review.

- International Journal of Human-Computer Interaction*, 1-18.
<https://doi.org/10.1080/10447318.2022.2041907>
- Loup-Escande, É., Burkhardt, J.-M., & Richir, S. (2013). Anticiper et évaluer l'utilité dans la conception ergonomique des technologies émergentes : Une revue. *Le Travail humain*, 76(1).
- Loup-Escande, É., Dominjon, L., Perret, D., Erhel, S., Jamet, E., Michinov, N., Andriot, C., Gravez, P., & Ragot, M. (2013, octobre 28). La démarche de Conception Centrée-Utilisateur en Réalité Virtuelle : L'exemple du projet Virtuali Teach. *8èmes journées de l'Association Française de Réalité Virtuelle, Augmentée, Mixte et d'Intéraction 3D*.
<https://univ-rennes2.hal.science/hal-01785027>
- Maddikunta, P. K. R., Pham, Q.-V., B, P., Deepa, N., Dev, K., Gadekallu, T. R., Ruby, R., & Liyanage, M. (2022). Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. *Journal of Industrial Information Integration*, 26.
<https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100257>
- Maderna, R., Poggiali, M., Zanchettin, A. M., & Rocco, P. (2020). An online scheduling algorithm for human-robot collaborative kitting. *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 11430-11435.
<https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9197431>
- Maguire, M. (2001). Methods to support human-centred design. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55(4), 587-634. <https://doi.org/10.1006/ijhc.2001.0503>
- Mahlke, S. (2008). *User Experience of Interaction with Technical Systems*. [Doctoral Thesis, Technischen Universität Berlin]. <https://doi.org/10.14279/depositonce-1793>
- Mahlke, S., & Thuring, M. (2007, April). Studying antecedent of emotional experiences in interactive contexts. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 915-918. <https://doi.org/10.1145/1240624.1240762>

- Makrini, I. E., Merckaert, K., Winter, J. D., Lefeber, D., & Vanderborght, B. (2019). Task allocation for improved ergonomics in Human-Robot Collaborative Assembly. *Interaction Studies. Social Behaviour and Communication in Biological and Artificial Systems*, 20(1), 102-133. <https://doi.org/10.1075/is.18018.mak>
- Martin, N. P. Y. (2018). *Acceptabilité, acceptation et expérience utilisateur : Évaluation et modélisation des facteurs d'adoption des produits technologiques* [Doctoral Thesis, Université Rennes 2]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01813563>
- McNair, T. (2006). *An ergonomic job analysis of a work process within a glovebox* [Master Thesis, New Jersey Institute of Technology]. <https://digitalcommons.njit.edu/theses/447>
- Mendels, F. (1984). Des industries rurales à la protoindustrialisation : Historique d'un changement de perspective. *Annales*, 39(5), 977-1008. <https://doi.org/10.3406/ahess.1984.283112>
- Miguel Lázaro, O. D., Mohammed, W. M., Ferrer, B. R., Bejarano, R., & Martinez Lastra, J. L. (2019). An Approach for adapting a Cobot Workstation to Human Operator within a Deep Learning Camera. *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 1, 789-794. <https://doi.org/10.1109/INDIN41052.2019.8972238>
- Minge, M., & Riedel, L. (2013). meCUE – Ein modularer Fragebogen zur Erfassung des Nutzungserlebens. In *meCUE – Ein modularer Fragebogen zur Erfassung des Nutzungserlebens*, 89-98. Oldenbourg Wissenschaftsverlag. <https://doi.org/10.1524/9783486781229.89>
- Ministère de l'économie des finances et de la souveraineté industrielle et numérique. (s. d.). *La fonction Recherche & Développement* [Site gouvernemental]. economie.gouv.fr. Consulté 17 novembre 2023, à l'adresse <https://www.economie.gouv.fr/facileco/fonction-recherche-developpement>

- Morin, E. (2008). *Sens du travail, santé mentale au travail et engagement organisationnel*. Rapport de recherche R-543, Études et recherches, 1-62. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. Consulté le 17 novembre 2023 à l'adresse <https://www.irsst.qc.ca/publications-et-outils/publication/i/100350/n/sens-du-travail-sante-mentale-au-travail-et-engagement-organisationnel-r-543>
- Mork, M. A., & Choi, S. D. (2015). An ergonomic assessment of sample preparation job tasks in a chemical laboratory. *Journal of Chemical Health & Safety*, 22(4), 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.jchas.2014.11.003>
- Moulières-Seban, T. (2017). *Conception de systèmes cobotiques industriels : Approche cognitive : Application à la production pyrotechnique au sein d'Ariane Group* [Doctoral Thesis, Université de Bordeaux]. <https://theses.hal.science/tel-01697610>
- Müller, J. (2020). *Enabling Technologies for Industry 5.0 : Results of a workshop with Europe's technology leaders*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/082634>
- Mundutéguy, C., & Darses, F. (2007). Perception et anticipation du comportement d'autrui en situation simulée de conduite automobile. *Le Travail humain*, 70(1), 1-32. <https://doi.org/10.3917/th.701.0001>
- Murphy, A. (2017, juin 2). Industrial : Robotics Outlook 2025 [Deepwater Asset Management]. *Deepwater Asset Management*. Consulté 17 novembre 2023, à l'adresse <https://deepwatermgmt.com/intro-robotics-outlook-2025/>
- Norman, D. A., & Draper, S. W. (1986). *User Centered System Design; New Perspectives on Human-Computer Interaction*. L. Erlbaum Associates Inc. 526.
- Organisation internationale de normalisation. (2019). *ISO 9241-210. Ergonomie de l'interaction homme-système. Partie 210: Conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs*. <https://www.iso.org/fr/standard/77520.html>

- O'Shea, N., Kennedy, D., Tobin, J. T., & Fenelon, M. A. (2021). Reconstituting infant formula powder using a collaborative robot 'CoBoT' to mimic human biomechanical movements. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102562>
- Peshkin, M. A., & Colgate, J. E. (1999). Cobots. *Industrial Robot*, 26(5), 335-341.
- Peternel, L., Tsagarakis, N., Caldwell, D., & Ajoudani, A. (2018). Robot adaptation to human physical fatigue in human-robot co-manipulation. *Autonomous Robots*, 42(5), 1011-1021. <https://doi.org/10.1007/s10514-017-9678-1>
- Philippette, T. (2016). Etudier les pratiques collectives de jeux vidéo : L'allo- auto-confrontation aux traces de l'activité. *Composite*, 19(1).
- Pic, F. (1987). Observation of radioactive materials machining on a digital lathe in a glove box. *CEA-CONF--8977*, 22. Centre d'Études de Bruyeres-le-Chatel.
- Pollak, A., Paliga, M., Pulopulos, M. M., Kozusznik, B., & Kozusznik, M. W. (2020). Stress in manual and autonomous modes of collaboration with a cobot. *Computers in Human Behavior*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106469>
- Quéinnec, Y., Marquié, J. C., & Thon, B. (1991). Modèle, comportement et analyse du travail. In R. Amalberti, M. de Montmollin, J. Theureau (Éds.). *Modèles en analyse du travail*, (pp. 25-47). Pierre Mardaga Éditeur.
- Quenehen, A., Pocachard, J., & Klement, N. (2019). Process optimisation using collaborative robots—Comparative case study. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 60-65. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.131>
- Rabardel, P., Carlin, N., & Chesnais, M. (2002). *Ergonomie : Concepts et méthodes* ([4e édition]). Octarès. 182.
- Realyvásquez-Vargas, A., Cecilia Arredondo-Soto, K., Luis García-Alcaraz, J., Yail Márquez-Lobato, B., & Cruz-García, J. (2019). Introduction and configuration of a collaborative

- robot in an assembly task as a means to decrease occupational risks and increase efficiency in a manufacturing company. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 57, 315-328. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.12.015>
- Rogers, E. M. (1983). *Diffusion of innovations* (3rd ed.). Free Press. 236.
- Román Ibáñez, V., Pujol, F. A., García Ortega, S., & Sanz Perpiñán, J. M. (2021). Collaborative robotics in wire harnesses spot taping process. *Computers in Industry*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103370>
- Rubio, S., Díaz, E., Martín, J., & Puente, J. M. (2004). Evaluation of Subjective Mental Workload : A Comparison of SWAT, NASA-TLX, and Workload Profile Methods. *Applied Psychology*, 53(1), 61-86. <https://doi.org/10.1111/j.1464-0597.2004.00161.x>
- Ruiller, C. (2008). *Le soutien social au travail : conceptualisation, mesure et influence sur l'épuisement professionnel et l'implication organisationnelle : l'étude d'un cas hospitalier* [Doctoral Thesis, Université Rennes 1]. <https://theses.hal.science/tel-00523398>
- Salotti, J.-M., Ferreri, E., Ly, O., & Daney, D. (2018). Classification des Systèmes Cobotiques. *Ingénierie cognitive*, 1(1). <https://hal.science/hal-01943946>
- Salunkhe, O., Stensöta, O., Åkerman, M., Berglund, Å. F., & Alveflo, P.-A. (2019). Assembly 4.0: Wheel Hub Nut Assembly Using a Cobot. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1632-1637. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.434>
- Scapin, D.L., & Bastien, J. (1997). Ergonomic criteria for evaluating the ergonomic quality of interactive systems. *Behaviour & Information Technology*, 16(4-5), 220-231.
- Schaik, P., & Ling, J. (2011). An integrated model of interaction experience for information retrieval in a Web-based encyclopaedia. *Interacting with Computers*, 23, 18-32. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2010.07.002>

- Scholtz, J. (2003). Theory and evaluation of human robot interactions. *36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Hawaii. https://www.academia.edu/47987177/Theory_and_evaluation_of_human_robot_interactions
- Schoose, C. (2022). *From traditional deburring to cobot use : Analysis of the professional gesture in order to prevent musculoskeletal disorders* [Doctoral Thesis, Université Grenoble Alpes]. <https://theses.hal.science/tel-03942554>
- Schoose, C., Cuny-Guerrier, A., Caroly, S., Claudon, L., Wild, P., & Savescu, A. (2023). Evolution of the biomechanical dimension of the professional gestures of grinders when using a collaborative robot. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 29(2), 668-675. <https://doi.org/10.1080/10803548.2022.2065063>
- Sée, H. (1910). E. Tarlé. L'industrie dans les campagnes en France à la fin de l'Ancien Régime. *Annales de Bretagne et des pays de l'Ouest*, 26(3), 624-625.
- Sharma, A. (2019, janvier 14). *Cobot Market Outlook Still Strong, Says Interact Analysis*. Robotics Business Review. Consulté 23 janvier 2023, à l'adresse <https://www.roboticsbusinessreview.com/manufacturing/cobot-market-outlook-strong/>
- Six, F. (2016). *L'ergonome et le chantier*. Octarès Editions. <https://www.galignani.fr/livre/9782366300598-l-ergonome-et-le-chantier-francis-six/>
- Spezialetti, M., Placidi, G., & Rossi, S. (2020). Emotion Recognition for Human-Robot Interaction : Recent Advances and Future Perspectives. *Frontiers in Robotics and AI*, 7. <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.532279>
- Sung, P.-C., & Chiu, Y.-S. P. (2019). Subjective Evaluation of Glovebox Gloves on Hand Tactility and Discomfort. *Proceedings of the 2019 International Conference on Management Science and Industrial Engineering*, 245-249. <https://doi.org/10.1145/3335550.3335567>

- Sung, P.-C., Liu, Y.-P., & Chen, I.-L. (2020). Effects of Glovebox Glove Properties on Hand Strength. *Proceedings of the 2020 2nd International Conference on Management Science and Industrial Engineering*, 291-295. <https://doi.org/10.1145/3396743.3396749>
- Terrade, F., Pasquier, H., Reerinck-Boulanger, J., Guingouain, G., & Somat, A. (2009). L'acceptabilité sociale : La prise en compte des déterminants sociaux dans l'analyse de l'acceptabilité des systèmes technologiques. *Le Travail humain*, 72(4), 383-395. <https://doi.org/10.3917/th.724.0383>
- Thallemer, A. M., Kostadinov, A., & Diensthuber, D. (2018). Getting to Grips with Cobots : Concept Design of a Modular and Re-configurable Gripper for Hybrid Co-working. *Transdisciplinary Conference on Support Technologies*, University of the German Federal Armed Forces - Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg.
- Thompson, R. L., Higgins, C. A., & Howell, J. M. (1991). Personal Computing : Toward a Conceptual Model of Utilization. *MIS Quarterly*, 15(1), 125-143. <https://doi.org/10.2307/249443>
- Thurrow, K. (2023). Strategies for automating analytical and bioanalytical laboratories. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 415(21), 5057-5066. <https://doi.org/10.1007/s00216-023-04727-2>
- Tokatli, O., Das, P., Nath, R., Pangione, L., Altobelli, A., Burroughes, G., Jonasson, E. T., Turner, M. F., & Skilton, R. (2021). Robot-Assisted Glovebox Teleoperation for Nuclear Industry. *Robotics*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/robotics10030085>
- Tomás, J.-L. (2013). L'analyse psychologique du développement des gestes professionnels : Une perspective pour la prévention des TMS ? *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, 15-1. <https://doi.org/10.4000/pistes.3234>

- Triandis, H. C. (1980). Values, Attitudes, and Interpersonal Behavior. *Nebraska Symposium on Motivation*, University of Nebraska Press, Lincoln.
- Triolet, J., Capois, J., Gautret de la Moricière, G., Lê Quang, X., Petit, J. M., Protois, J. C., & Rocher, M. (2002). La conception des laboratoires de chimie. *Hygiène et sécurité du travail*, 188(3).
- Turkle, S., Taggart, W., Kidd, C., & Dasté, O. (2006). Relational artifacts with children and elders : The complexities of cybercompanionship. *Connect Sci*, 18(4), 347-362.
- Van Valen, L. (1973). A new evolutionary law. *Evol. Theory*, 1(1), 1-30.
- Venkatesh, V., & Bala, H. (2008). Technology Acceptance Model 3 and a Research Agenda on Interventions. *Decision Sciences*, 39(2), 273-315. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2008.00192.x>
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly*, 27(3), 425-478. <https://doi.org/10.2307/30036540>
- Venkatesh, V., Thong, J. Y. L., & Xu, X. (2012). Consumer Acceptance and Use of Information Technology: Extending the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology. *MIS Quarterly*, 36(1), 157-178. <https://doi.org/10.2307/41410412>
- Vygotsky, L. S. (1930). La méthode instrumentale en psychologie. In B. Schneuwly & J.-P. Bronckart (Éd.), *Vygotsky aujourd'hui* (pp. 39-48), Delachaux et Niestlé.
- Wada, K., & Shibata, T. (2007). Living with seal robots—Its sociopsychological and physiological influences on the elderly at a care house. *IEEE Trans Robot*, 23(5), 972-980.
- Webb, C., Gaydos, S., Estrada, A., & Milam, L. (2010). *Toward an Operational Definition of Workload: A Workload Assessment of Aviation Maneuvers* (ADA528341). Army Aeromedical Research Lab. 50

- Weckenborg, C., & Spengler, T. S. (2019). Assembly Line Balancing with Collaborative Robots under consideration of Ergonomics: A cost-oriented approach. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1860-1865. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.473>
- Wojtynek, M., Leichert, J., & Wrede, S. (2020). Assisted Planning and Setup of Collaborative Robot Applications in Modular Production Systems. *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 1, 387-394. <https://doi.org/10.1109/ETFA46521.2020.9212083>
- Woronoff, D. (1995). *Histoire de l'industrie en France du XVIe siècle à nos jours*, Seuil. https://www.persee.fr/doc/hsr_1254-728x_1995_num_4_1_1177_t1_0336_0000_2
- Wurhofer, D., Meneweger, T., Fuchsberger, V., & Tscheligi, M. (2015). Deploying Robots in a Production Environment: A Study on Temporal Transitions of Workers' Experiences. In J. Abascal, S. Barbosa, M. Fetter, T. Gross, P. Palanque, & M. Winckler (Éds.), *Human-Computer Interaction – INTERACT 2015*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 9298, (pp. 203-220), Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22698-9_14
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 530-535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>
- Yuan, S., Gao, Z., Dong, M., Liu, L., Xu, T., Guo, K., & Wu, F. (2021). Evaluation of Human-Robot Collaborative Assembly Task Allocation Plan. In Y. Wang, K. Martinsen, T. Yu, & K. Wang (Éds.), *Advanced Manufacturing and Automation X*, (pp. 487-495). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6318-2_61

Annexes

Annexe 1. CV Fournier Étienne.....	277
Annexe 2. Présentation de la démarche d'intervention.....	280
Annexe 3. Présentation des entretiens sur le terrain aux opérateurs.....	281
Annexe 4. Restitution au comité de pilotage.....	282
Annexe 5. Présentation de l'expérience.....	291
Annexe 6. Formulaire de consentement.....	292
Annexe 7. Tableau MANOVA Vi « expertise » 3ème TUs (SPSS).....	294
Annexe 8. Tableau MANOVA Vi « adaptation » 3ème TUs (SPSS).....	295
Annexe 9. Alphas de Cronbach du questionnaire d'acceptabilité du 2ème TU.....	296
Annexe 10. Analyse factorielle du questionnaire d'acceptabilité du 2ème TU.....	298
Annexe 11. Tableau MANOVA Vd « acceptabilité » 2ème TUs (SPSS).....	299
Annexe 12. État des connaissances de l'effet de la collaboration cobotique sur les variabilités (vert) et les recherches à effectuer (rouge).....	300

Annexe 1. CV

ACL – Articles publiés dans des revues indexées dans des bases de données internationales

(N = 3) :

Fournier, É., Jeoffrion, C., Hmedan, B., Pellier, D., Fiorino, H. Landry, A. Human-cobot collaboration's impact on success, time completion, errors, workload, gestures and acceptability during an assembly task. *Applied Ergonomics*, 119(104306). <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2024.104306>

Fournier, É., Jeoffrion, C., & Landry, A. (2023). Les opérateurs chimistes en laboratoire du futur : quelle activité ? *Conference Proceedings of the Société d'Ergonomie de Langue Française (SELF)*, 157-162 [*Ergonomics Abstracts*]. hal-04248633v1

Fournier, É., Kilgus, D., Landry, A., Hmedan, B., Pellier, D., Fiorino, H., & Jeoffrion, C. (2022). The impacts of human-cobot collaboration on perceived cognitive load and usability during an industrial task: an exploratory experiment. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 10(2), 83-90. DOI: 10.1080/24725838.2022.2072021

COM-I Communications dans des congrès internationaux (N = 6) :

Fournier, É., Jeoffrion, C., & Landry, A. (2024). Impacts of a cobotic system in a constrained work environment. 22nd Triennial Congress of the International Ergonomics Association, Jeju, South Korea, August 25-29.

Fournier, É., Jeoffrion, C., & Landry, A. (2023). Analyse d'une situation en vue de l'introduction d'un cobot : comment deux opérateurs collaborent dans une tâche d'assemblage ? XXIIème congrès AIPTLF, Montréal, Canada, 17-21 juillet.

Fournier, É., Jeoffrion, C., M. Ntsame Sima, & Landry, A. (2023). Comprendre les variabilités en situation de travail avant l'implémentation d'un robot collaboratif (cobot). XXIIème congrès AIPTLF, Montréal, Canada, 17-21 juillet.

Fournier, É., Jeoffrion, C., & Landry, A. (2023). Les opérateurs chimistes en laboratoire du futur : quelle activité ? 57è congrès de la SELF, Saint-Denis, Ile de la Réunion, France, 17-19 octobre.

Fournier, É., Jeoffrion, C., & Landry, A. (2023). How do collaborative robots impact the operator's work and well-being by dealing with variability? 21st EAWOP Congress (European Association of Work and Organizational Psychology), Katowice, Poland, 24-27 May.

Fournier, É., Landry, A., & Jeoffrion, C. (2022). Étude de l'influence des variabilités individuelles, inter-individuelles, organisationnelles et techniques sur la santé des salariés et la

performance en situation d'implémentation d'un cobot. Encontro Internacional sobre o trabalho, Universidade Federal da Paraiba, Joao Pessoa, Paraiba, Brésil, 26 août.

COM-N Communications dans des congrès nationaux (N = 3) :

Fournier, E., Jeoffrion, C., & Landry, A. (2024). Etude de l'impact des variabilités de la situation de travail en contexte d'implémentation cobotique. *Séminaire Travail Espace Activité (TEA)*. (Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris), 12 mars.

Fournier, E., Jeoffrion, C., & Landry, A. (2022). Etude de l'influence des variabilités individuelles, inter-individuelles, organisationnelles et techniques sur la santé des salariés et la performance en situation d'implémentation d'un cobot. *9e Junior Colloque du Réseau de Recherches en Psychologie du Travail et des Organisations* (Université-Jean Jaurès, Toulouse), 2 juin.

Fournier, E., Jeoffrion, C., & Landry, A. (2022). Etude de l'influence des variabilités individuelles, inter-individuelles, organisationnelles et techniques sur la santé des salariés et la performance en situation d'implémentation d'un cobot. *3ème édition des Rencontres Jeunes Chercheurs* (Université Grenoble-alpes, Grenoble), 23 juin.

Membre de comités scientifiques (CS) et/ou d'organisation (CO) de colloques internationaux et nationaux (N = 5)

- ✓ 6^e Rencontres Jeunes Chercheurs, Grenoble, 17-18 juin 2024 (CO).
- ✓ 22^e Congrès de l'AIPTLF, Montréal, 17-21 juillet 2023 (CO).
- ✓ 5^e Rencontres Jeunes Chercheurs, Grenoble, 22-23 juin 2023 (CO)
- ✓ 21^e European Association of Work and Organizational Psychology Congress, 24-27 mai, Katowice (CS).
- ✓ 56^e Congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française, Genève (CS).

Responsabilité de Journées d'étude (N = 1)

Membre du comité d'organisation de l'ANR PacBot :

Workshop, Variabilité et Adaptabilité dans la Collaboration entre Humains et Cobots, École Nationale Supérieure de Cognitique, Talence, 30 novembre 2023.

Direction de mémoires de master 2 (N = 1)

SALIFOU Morou. Mesure de l'utilisabilité d'un dispositif robotique dans une situation de travail hospitalier.

Conférences invitées de valorisation et diffusion des connaissances (N = 3)

Fournier, E., Landry, A. (2024). Les cobots et la psychologie du travail. *Pint of Science Festival*, 14 mai. Grenoble.

Fournier, E. (2022). Le cerveau et ses illusions. *Semaine du cerveau en établissements scolaires*, 15-17-18 mars. Grenoble.

Fournier, E. (2021). L'industrie 4.0 et la place du psychologue. *WebiPrev' de Preventica*, 25 octobre.

Activités d'enseignement (N = 7)

2022/2023 :

- 24h ETD en Ergonomie UX pour le M2 Ergonomie Socio-Cognitive des Systèmes Intelligents (ESCSI) de l'Université Savoie Mont Blanc
- 24h de ETD en Ergonomie cognitive pour le M2 Psychologie du Travail et Ergonomie de l'Université Grenoble Alpes
- 12,75h de ETD en Ergonomie cognitive et UX pour le Master (1 et 2) Informatique et Cognition (IC) de l'Université Grenoble Alpes
- 7,5 de ETD en Introduction à l'Ergonomie pour les M2 LEA parcours traduction spécialité multilingue (TSM)

2023/2024 :

- 24h de ETD en Ergonomie UX pour le M2 Ergonomie Socio-Cognitive des Systèmes Intelligents (ESCSI) de l'Université Savoie Mont Blanc
- 24h de ETD en Ergonomie cognitive pour le M2 Psychologie du Travail et Ergonomie de l'Université Grenoble Alpes
- 7,5 de ETD en Introduction à l'Ergonomie pour les M2 LEA parcours traduction spécialité multilingue (TSM)

Encadrements de rapports de stage professionnels (N = 2)

2022 : tuteur de stage d'un étudiant de Licence 2 Mathématiques et Informatique Appliquées aux Sciences Humaines (U.E. validée à la suite du stage)

2022 / 2023 : tuteur de stage d'un étudiant de Master 2 Psychologie du Travail et Ergonomie (diplôme obtenu à la suite du stage)






Responsabilité nationale (N = 1)

Secrétaire du Réseau des Jeunes Chercheurs en Ergonomie (2022-2023)

Responsabilité locale (N = 1)

Elu suppléant représentant des doctorants aux pôles de recherche (2022 / 2025)

Annexe 2. Présentation aux managers de la démarche d'intervention




PROJET ANR PACBOT

Le but de ce projet est de concevoir un collaborateur robot adapté aux variabilités humaines dans la situation de travail, facilitant ainsi le travail de l'expérimentateur(trice).

Le projet ANR PACBOT « Planification des Actions d'un CoBOT adaptées aux variabilités humaines » est financé par l'Agence Nationale de la Recherche, en partenariat avec : [CONFIDENTIEL], le Laboratoire Interuniversitaire de Psychologie (Chambéry et Grenoble), le Laboratoire d'Informatique de Grenoble (Grenoble) et l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (Bordeaux).

Il consiste à analyser les conditions dans lesquelles un robot collaborateur (cobot) pourrait faciliter le travail des expérimentateurs(trices). Pour s'assurer que le cobot aide convenablement l'expérimentateurs(trices) il convient dans un premier temps d'analyser la situation de travail.



Observations

Réunions et entretiens


Simulations et tests

Mesure de l'expérience

Modifications du cobot

Pour analyser le travail, des chercheurs en psychologie du travail et ergonomie (LIP Grenoble) vont intervenir dans le laboratoire. Ils vont observer comment le travail s'effectue, prendre des mesures et échanger avec les travailleurs(SES) afin d'établir une liste de toutes les variabilités dans la situation de travail.

L'aide des expérimentateurs(trices) est essentielle car ce sont eux les experts et les chercheurs doivent connaître le réel du travail quotidien et la diversité des travailleurs(SES), des façons de faire, afin de pouvoir rendre le cobot le plus adapté possible.









Ce travail d'équipe permettra d'établir de nouveaux process avec le cobot. Des groupes de travail entre chercheurs, expérimentateurs(trices) et leur encadrement seront nécessaires afin de valider ou non ces process. Le but est que le cobot soit une aide et pas un frein dans le travail.

Une fois les process validés, un prototype sera mis en œuvre et testé. Ce prototype sera modifié en fonction des retours jusqu'à la satisfaction de tous les utilisateurs.

Le cobot pourra donc être élaboré, testé et implémenté. Un accompagnement, sous forme d'entretiens et si nécessaire de modifications du cobot sera assuré par les chercheurs du projet jusqu'à satisfaction des expérimentateurs(trices).

etienne.fournier@univ-grenoble-alpes.fr
christine.jeoffrion@univ-grenoble-alpes.fr
aurelie.landry@univ-grenoble-alpes.fr



Annexe 3. Présentation de l'étude sur le terrain aux opérateurs

Dans le cadre d'un projet ANR, nous, des ergonomes et des psychologues du travail, intervenons au sein de votre structure dans le but d'identifier des **points d'amélioration des conditions de travail**. Pour cela, nous avons besoin de vous. Nous souhaitons avoir votre avis sur le fonctionnement de votre structure de façon **anonyme**. Également, nous souhaitons comprendre les tâches que vous réalisez au quotidien, vos préférences ainsi que l'impact du travail sur vous. Cet entretien dure environ **45 minutes**. Les données récoltées sont anonymes, nous n'aurons pas de données personnelles sur vous, juste vos réponses. Les données seront exploitées de façon **globale et non individuelle**. Les questionnaires seront stockés dans un endroit sécurisé (stockage à l'Université Grenoble Alpes), seulement accessibles par les ergonomes et psychologues du travail en lien avec le projet.

Annexe 4. Diaporama de restitution au comité de pilotage



PACBOT : analyse de l'activité des chimistes en laboratoire du futur en vue de l'implémentation d'un cobot



Étienne Fournier, doctorant et psychologue du travail
s/d Christine Jeoffrion, Professeure des Universités et psychologue du travail
et Aurélie Landry, Enseignante chercheure et ergonomiste

La demande  :

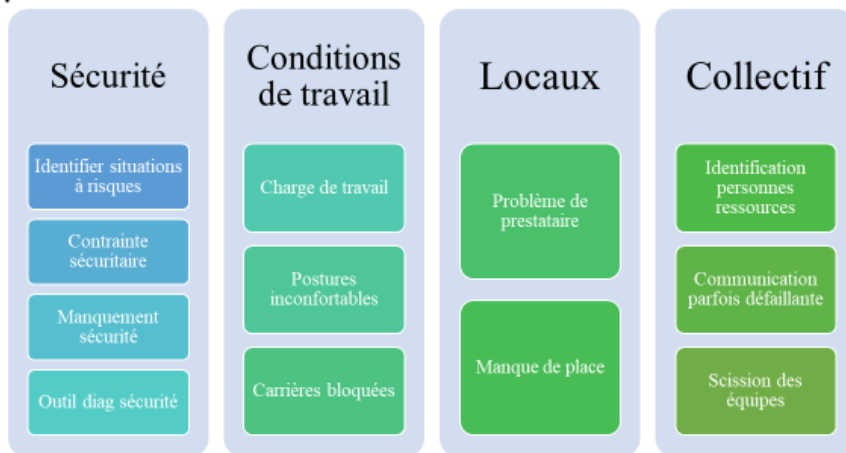
Avoir un point de vue externe sur l'organisation du travail



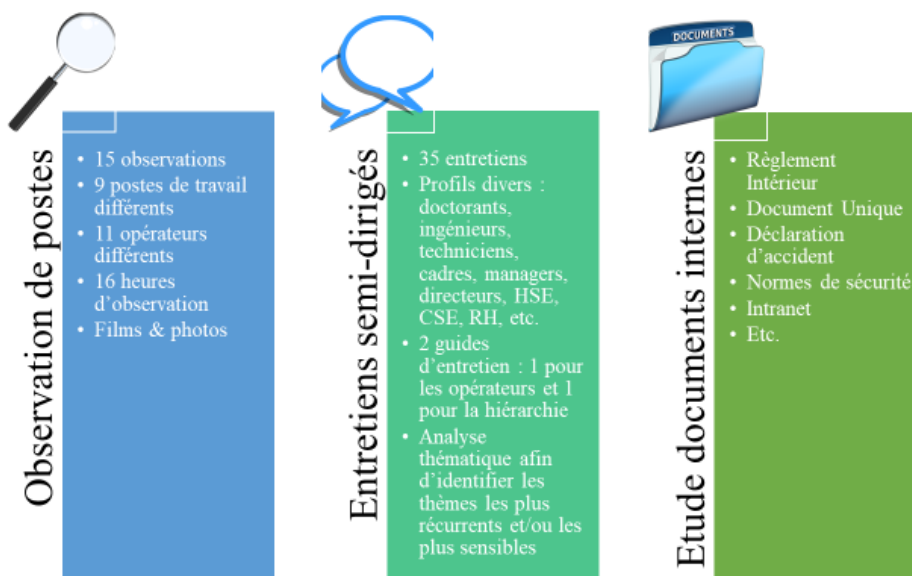
Analyse des forces et faiblesses du LOF
au niveau de l'organisation du travail

Analyse de la demande

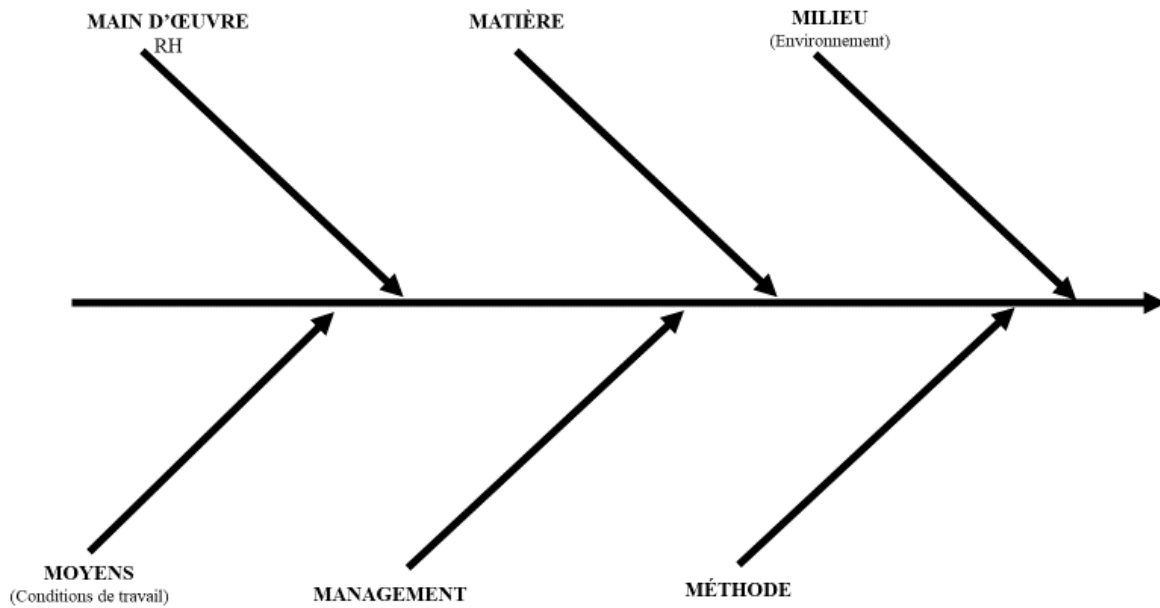
Volonté d'une analyse des forces et des faiblesses notamment tournant autour de ces points :



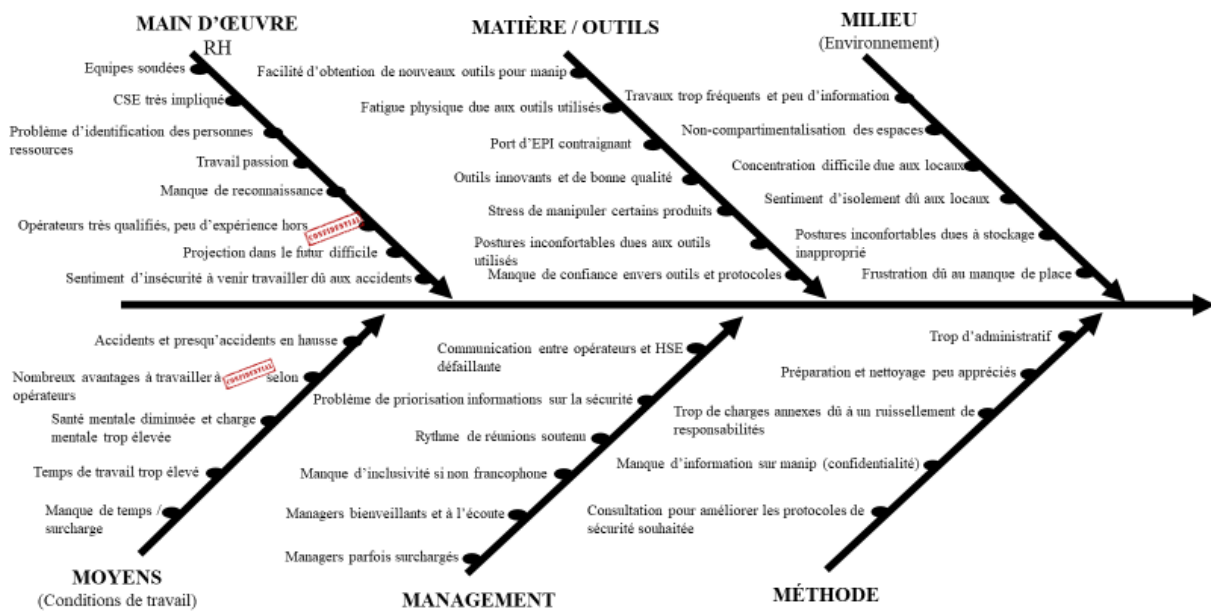
Méthodes utilisées



Présentation diagramme Ishikawa



Résultats de l'analyse des forces et des faiblesses



Résultats de l'analyse des forces et des faiblesses



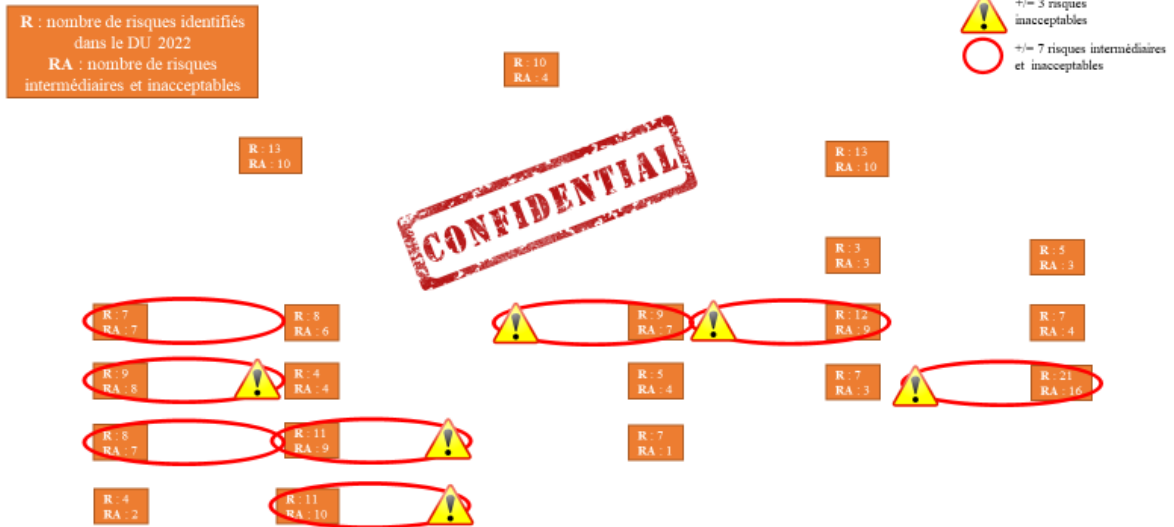
	En faveur	En défaveur
	Forces	Faiblesses
Interne	Travail passion Relationnel Management	Charge de travail Locaux Contraintes procédures de sécurité
Externe	Opportunités	Menaces
	Innovation scientifique Evolution des opérateurs	Epuisement des opérateurs Accidents et presque accidents

La demande du projet PACBOT

- **PACBOT (but)** : L'objectif général du projet PACBOT est de concevoir un système cobotique semi-autonome pour l'assistance d'opérateurs dans un contexte industriel, capable de choisir, de synchroniser et de coordonner des tâches réparties entre l'humain et le cobot en s'adaptant à différents types de variabilités, tout en anticipant des situations dangereuses.
- **Intervention menée** : Repérer quel **poste de travail** bénéficierait le plus du cobot



Etude du DU 2022 : Postes à risques



Etude du Document Unique

- Risques *biologiques* et *chimiques* : **52 risques** ⚠️
- *Équipement* (BAG, sous pression, brûlure) : **40 risques** ⚠️
- *Ambiance* (éclairage, bruit) : **23 risques** ⚠️
- *Incendie* (produit inflammable) : **13 risques**
- *Charge mentale* (stress, harcèlement, manipulation produits mortels) : **12 risques**
- *Posture* (télétravail, manutention, sorbonne, boîte à gants) : **11 risques**
- *Chutes* (stockage en hauteur) : **10 risques**
- *Electricité* (contact équipement en tension) : **7 risques**
- *Autres risques* (pandémie, chute objets en hauteur) : **4 risques**



**Postes où les principaux risques sont rassemblés
selon le DU 2022 ?**

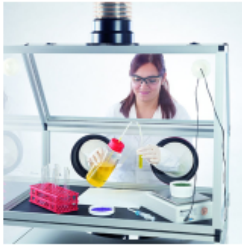


Sorbonne

Que ressort des observations et de entretiens?

Risques communs

- Stress dû à la manipulation de produits mortels
- Mauvaises postures (douleurs, gêne, danger sur long terme)
- Difficulté de déplacement
- Environnement surchargé
- Surcharge informationnelle
- Attention constante + nombreuses heures de travail = danger pendant manipulation expérimentale



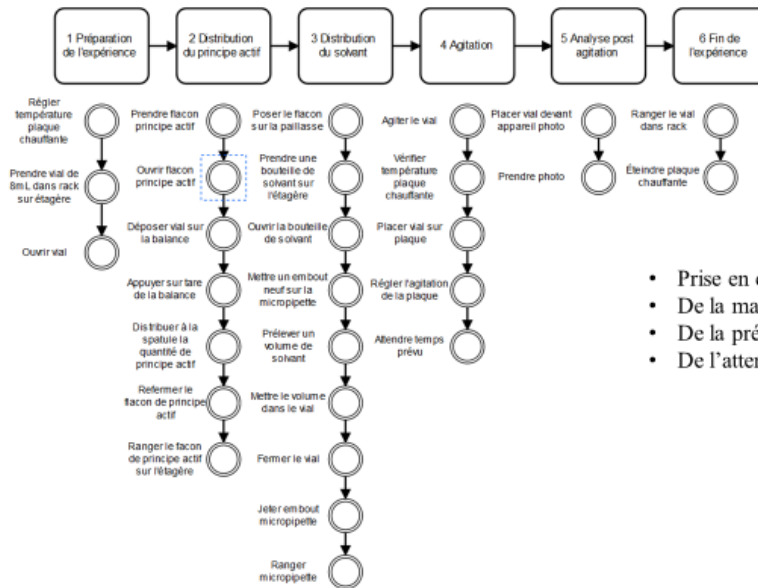
Boîte à gants (BAG)

Risques spécifiques BAG

- Projets en BAG peu appréciés
- Equipements de Protection Individuel inadéquats
- Mouvements non optimisés
- Déplacements difficiles

11

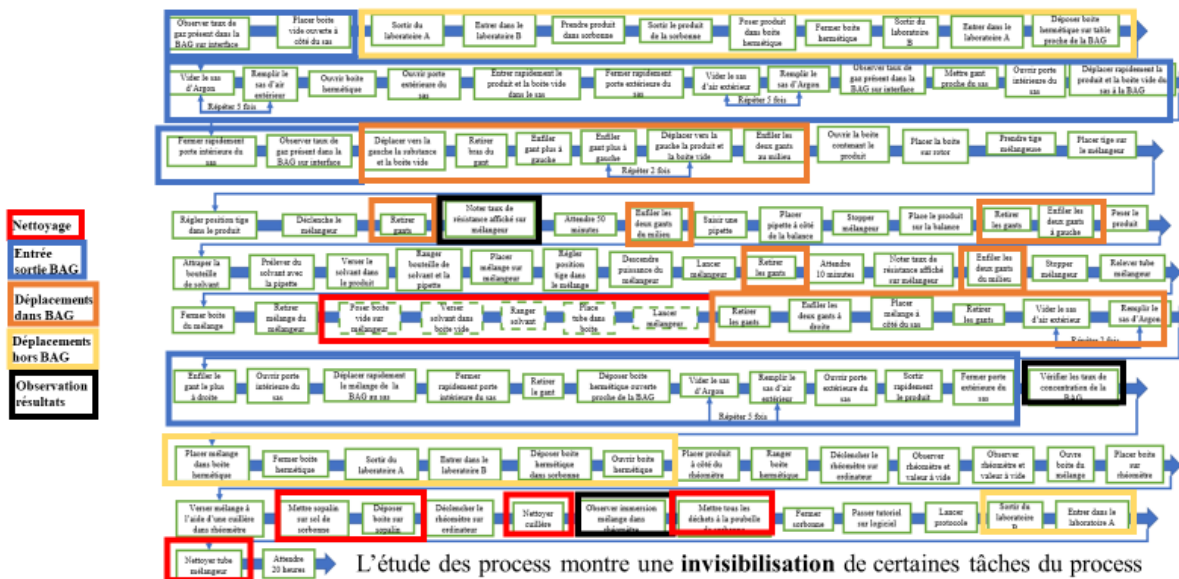
Process fourni au début du projet



- Prise en compte du rangement
- De la manipulation
- De la préparation du matériel
- De l'attente

12

Process observé et validé par entretiens



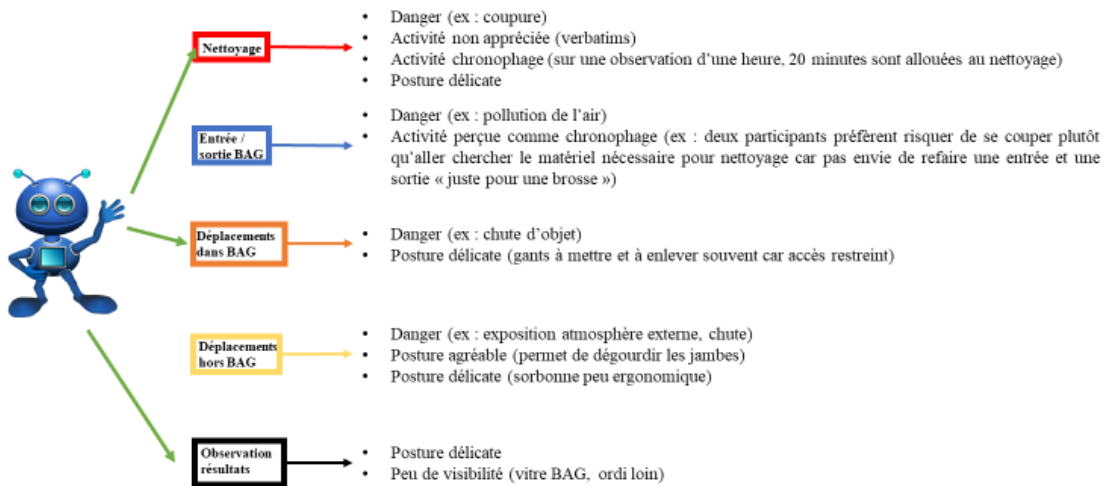
13

Quels impacts a l'écart entre la tâche prescrite et l'activité ? (observation / entretien) ?

- Nettoyage →
 - Danger (ex : coupure)
 - Activité non appréciée (verbatim)
 - Activité chronophage (sur une observation d'une heure, 20 minutes sont allouées au nettoyage)
 - Posture délicate
- Entrée / sortie BAG →
 - Danger (ex : pollution de l'air)
 - Activité perçue comme chronophage (ex : deux participants préfèrent risquer de se couper plutôt qu'aller chercher le matériel nécessaire pour nettoyage car pas envie de refaire une entrée et une sortie « juste pour une brosse »)
- Déplacements dans BAG →
 - Danger (ex : chute d'objet)
 - Posture délicate (gants à mettre et à enlever souvent car accès restreint)
- Déplacements hors BAG →
 - Danger (ex : exposition atmosphère externe, chute)
 - Posture agréable (permet de dégourdir les jambes)
 - Posture délicate (sorbonne peu ergonomique)
- Observation résultats →
 - Posture délicate
 - Peu de visibilité (vitre BAG, ordi loin)

14

Comment le cobot pourrait aider ?



15

Hypothèses ?

H1 : Les postures les plus indécrites sont prises lors des phases de nettoyage et déplacements en BAG

H2 : Les phases de nettoyage et de déplacement contiennent plus de prises de risques que les autres

H3 : Les phases de nettoyage et de déplacement sont les moins appréciées de la manipulation expérimentale

H4 : Des informations visuelles sont nécessaires pour observer les résultats des manipulations expérimentales, pour les obtenir, les opérateurs prennent des postures inconfortables

Les limites ?



Non souhaitable par les opérateurs en BAG :

- Pas assez de place en BAG (trop d'encombrement déjà présent)
- Acceptabilité sociale : éviter de « prendre » les tâches qu'ils aiment effectuer

Ce qu'il reste à faire

Deux décisions :

1. Choisir une **suite** pour la fin du projet PACBOT :
 - Mise en place d'une **simulation** si projet interne d'implantation d'un cobot (stage master 2) ?
2. Définir le **livrable** suite à l'analyse des forces et des faiblesses
 - Livrable qui entre en détail sur le diagramme présenté et qui propose des **recommandations**

Merci de votre attention !

Place aux questions / commentaires !

Annexe 5. Présentation de l'expérience



Numéro de l'expérience : LIP_21-22_259

Titre de l'expérience : Impact de la collaboration sur la charge ment

Durée de la passation / rémunération : Environ une heure (💰
concerné)

Lieu de passation ou point de rendez-vous : 📍 IMAG

Critères d'inclusion / exclusion :



- A partir de 18 ans
- Pas de trouble de perception des couleurs
- Pas de douleurs dans les membres supérieurs
- Pas de dyscalculie

Vous réaliserez deux tâches d'assemblage en collaboration en ayant le haut du corps filmé.
Après chaque tâche, vous répondrez à un questionnaire en ligne.

Pour participer à l'étude, veuillez choisir un des créneaux disponibles sur le lien suivant :
https://evento.renater.fr/survey/lip_21-22_259-impact-de-la-collaboration-sur-la-charge-mentale-et-la-performance-yoz198b8

Coordonnées de l'expérimentateur : etienne.fournier@univ-grenoble-alpes.fr



Annexe 6. Formulaire de consentement

NOTICE D'INFORMATION et CONSENTEMENT ECLAIRE

Titre du projet : Impacts de la collaboration sur la charge de travail, la performance et les mouvements.

Chercheur titulaire responsable scientifique du projet :

Landry Aurélie, aurelie.landry@univ-grenoble-alpes.fr, 0476825912

Lieu(x) de recherche : Bâtiment IMAG, Université Grenoble Alpes

But du projet de recherche :

L'objectif est d'identifier les impacts de la collaboration sur la manière d'effectuer la tâche et ses conséquences.

Ce que l'on attend de vous (méthodologie)

Vous allez réaliser deux tâches d'assemblage de Duplo en collaboration. Vous serez filmé.e pendant ces tâches afin de nous permettre d'avoir des informations sur votre façon de collaborer.

Vos droits de vous retirer de la recherche en tout temps

Vous déclarez être volontaire à cette recherche. Vous pouvez arrêter l'expérience à tout moment, sans justification, il suffira d'en avertir l'expérimentateur. Votre décision de participer, de refuser de participer, et/ou de cesser votre participation n'aura aucun effet sur vos notes, votre statut et sur votre rapport avec le laboratoire.

Vos droits à la confidentialité et au respect de la vie privée

Les données obtenues grâce à votre participation ne seront utilisées qu'à des fins de recherche et seront traitées avec la plus entière confidentialité. Pour ceci, nous vous demanderons de vous créer un code participant qui sera utilisé pour masquer votre identité. Toutes les données seront gardées dans un endroit sécurisé et seuls le responsable scientifique et les chercheurs y auront accès. Vous pourrez détruire vos données à la suite de l'expérience en contactant le responsable de l'étude et en lui renseignant votre code participant. En revanche, une fois les données anonymisées, les codes participants seront détruits, nous ne pourrions donc plus détruire vos données puisqu'elles seront anonymes.

Bénéfices

Notre recherche vise à montrer que la collaboration avec un cobot allège la charge de travail des participants et augmente leur performance par rapport à une collaboration avec un humain.

Risques possibles

A notre connaissance, notre étude ne possède pas de risque pour les participants.

Diffusion

Cette recherche sera diffusée dans des colloques et elle sera publiée dans des actes de colloque et des articles de revues académiques.

Vos droits de poser des questions en tout temps

Vous pouvez poser des questions concernant la recherche en tout temps en communiquant avec le responsable scientifique du projet ou par courrier électronique à etienne.fournier@univ-grenoble-alpes.fr.

Consentement à la participation

En signant le formulaire de consentement, vous certifiez que vous avez lu et compris les renseignements ci-dessus, qu'on a répondu à vos questions de façon satisfaisante et qu'on vous a avisé que vous étiez libre d'annuler votre consentement ou de vous retirer de cette recherche en tout temps, sans préjudice.

A remplir par le participant :

- J'ai lu et compris les renseignements ci-dessus et j'accepte de plein gré de participer à cette recherche.
- J'ai pris connaissance des mesures de sécurité sanitaire liées à la COVID-19 en vigueur sur le lieu de la recherche visant à protéger autrui et à me protéger et je m'engage à les respecter.

Nom, Prénom – Date – Signature

Annexe 7. Tableau MANOVA Vi « expertise » 3èmeTUs (SPSS)

Tests univariés

Variable dépendante	Somme des carrés	df	Carré moyen	F	Sig.	Eta-carré partiel
Accept	Contraste	1	,012	,001	,974	,000
	Erreur	36	11,148			
Workload	Contraste	1	6262,667	1,633	,209	,043
	Erreur	36	3834,571			
Errors	Contraste	1	23,684	4,369	,044	,108
	Erreur	36	5,421			
Time	Contraste	1	10982,000	1,505	,228	,040
	Erreur	36	7297,418			
Gest	Contraste	1	160,105	2,565	,118	,067
	Erreur	36	62,430			
Risks	Contraste	1	2,632	4,813	,035	,118
	Erreur	36	,547			
Glove Level	Contraste	1	16,447	6,548	,015	,154
	Erreur	36	2,512			

Le test de F permet de tester l'effet de l'Expert. Il s'appuie sur les comparaisons appariées (indépendantes) linéaires parmi les moyennes marginales estimées.

Annexe 8. Tableau MANOVA Vi « adaptation » 3èmeTUs (SPSS)

Tests univariés

Variable dépendante	Somme des carrés	df	Carré moyen	F	Sig.	Eta-carré partiel
Accept	Contraste	1	,947	,085	,772	,002
	Erreur	36	11,122			
Workload	Contraste	1	819,796	,206	,653	,006
	Erreur	36	3985,762			
Errors	Contraste	1	10,526	1,819	,186	,048
	Erreur	36	5,787			
Time	Contraste	1	7006,737	,946	,337	,026
	Erreur	36	7407,842			
Gest	Contraste	1	30,421	,461	,502	,013
	Erreur	36	66,032			
Risks	Contraste	1	5,158	10,822	,002	,231
	Erreur	36	,477			
Glove Level	Contraste	1	16,447	6,548	,015	,154
	Erreur	36	2,512			

Le test de F permet de tester l'effet de Adapt. Il s'appuie sur les comparaisons appariées (indépendantes) linéaires parmi les moyennes marginales estimées.

Annexe 9. Alphas de Cronbach du questionnaire d'acceptabilité du 2^{ème} TU

Facilité d'utilisation perçue

Statistiques de fiabilité

Alpha de Cronbach	Alpha de Cronbach basé sur des éléments standardisés	Nombre d'éléments
,826	,827	4

Cohérence perçue

Statistiques de fiabilité

Alpha de Cronbach	Alpha de Cronbach basé sur des éléments standardisés	Nombre d'éléments
,888	,890	3

Plaisir perçue

Statistiques de fiabilité

Alpha de Cronbach	Alpha de Cronbach basé sur des éléments standardisés	Nombre d'éléments
,857	,859	5

Utilité perçue

Statistiques de fiabilité

Alpha de Cronbach	Alpha de Cronbach basé sur des éléments standardisés	Nombre d'éléments
,924	,924	4

Influence sociale perçue

Statistiques de fiabilité

Alpha de Cronbach	Alpha de Cronbach basé sur des éléments standardisés	Nombre d'éléments
,934	,935	3

Confiance

Statistiques de fiabilité

Alpha de Cronbach	Alpha de Cronbach basé sur des éléments standardisés	Nombre d'éléments
,920	,920	4

Annexe 10. Analyse factorielle du questionnaire d'acceptabilité du 2^{ème} TU

Composante	Sommes de rotation du carré des chargements				% cumulé
	Total	% de la variance	Total	% de la variance	
1	9,263	40,276	3,346	14,550	14,550
2	2,382	10,355	3,329	14,475	29,025
3	2,108	9,164	3,206	13,941	42,966
4	1,634	7,105	2,989	12,994	55,960
5	1,400	6,086	2,668	11,598	67,558
6	1,352	5,879	2,601	11,307	78,865
7					
8					
9					

Annexe 11. Tableau MANOVA Vd « acceptabilité » 3èmeTUs (SPSS)

Tests univariés

Variable dépendante	Somme des carrés	df	Carré moyen	F	Sig.	Eta-carré partiel
Usabi						
Contraste	38,265	1	38,265	27,680	<,001	,193
Erreur	160,359	116	1,382			
Coher						
Contraste	6,484	1	6,484	2,914	,091	,025
Erreur	258,124	116	2,225			
Pleas						
Contraste	7,572	1	7,572	5,427	,022	,045
Erreur	161,867	116	1,395			
Usefu						
Contraste	,576	1	,576	,235	,629	,002
Erreur	284,361	116	2,451			
Influ						
Contraste	,251	1	,251	,114	,737	,001
Erreur	256,650	116	2,212			
Trust						
Contraste	,183	1	,183	,115	,735	,001
Erreur	183,883	116	1,585			
Accept						
Contraste	3,772	1	3,772	3,812	,053	,032
Erreur	114,801	116	,990			

Le test de F permet de tester l'effet de Collab. Il s'appuie sur les comparaisons appariées (indépendantes) linéaires parmi les moyennes marginales estimées.

Annexe 12. État des connaissances de l'effet de la collaboration cobotique sur les variabilités (vert) et les recherches à effectuer (rouge)

Variabilités			En laboratoire	Sur le terrain	Effets court terme	Effets long terme
Variabilités techniques	Normales	Milieu	Fournier et al. (étude 4)		Fournier et al. (étude 4)	
		Matériel				
		Outils				
	Incidentelles	Milieu				
		Matériel				
		Outils				
Variabilités organisationnelles	Normales	Collectif	Fournier et al. (étude 3)		Fournier et al. (étude 3)	
		Règles Collectif				
		Règles				
Variabilités inter-individuelles	Court-terme	Physiques	Lagomarsino et al. (2022) Chacón et al. (2020)		Lagomarsino et al. (2022) Chacón et al. (2020)	
		Cognitives				
		Psychosociales				
		Physiques				
		Cognitives				
		Psychosociales				
Variabilités intra-individuelles	Court-terme	Physiques	Peternel et al. (2018) Fournier et al. (étude 3)		Peternel et al. (2018) Fournier et al. (étude 3)	
		Cognitives				
		Psychosociales				
		Physiques				
		Cognitives				
		Psychosociales				